

WO02093209

**Title:**  
**LENS SYSTEM CONSISTING OF FLUORIDE CRYSTAL LENSES**

**Abstract:**

A lens system, especially a projection lens system for a microlithographic projection illumination system, comprising at least one fluoride crystal lens. The disruptive influence of birefringence is reduced by using a lens which is a lens (100) with a lens axis which is approximately perpendicular in relation to the crystal planes {100} or the equivalent crystal planes of the fluoride crystal. In lens systems consisting of at least two fluoride crystal lenses, it is useful to arrange the fluoride crystal lenses in such a way that they are twisted in relation to each other. The lens axes of the fluoride crystal lenses can thus point in crystal direction (111) or (110), in addition to direction (100). It is also possible to reduce the disruptive influence of birefringence by using groups with twisted (100) lenses and groups with other twisted lenses (111) or other twisted (110) lenses. The disruptive influence of birefringence can be reduced further by providing the optical element with a compensating coating.

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES  
PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum  
Internationales Büro



(43) Internationales Veröffentlichungsdatum  
21. November 2002 (21.11.2002)

PCT

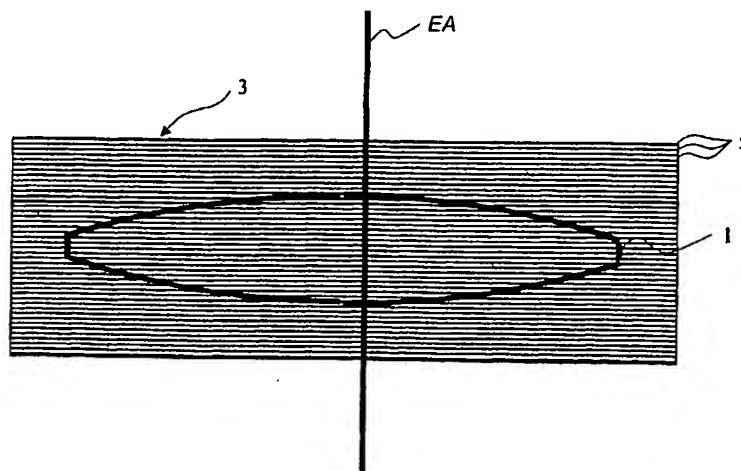
(10) Internationale Veröffentlichungsnummer  
**WO 02/093209 A2**

- (51) Internationale Patentklassifikation<sup>7</sup>: **G02B 3/00** (71) Anmelder (nur für AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE, TR): **CARL ZEISS** [DE/DE]; 89518 Heidenheim (Brenz) (DE).
- (21) Internationales Aktenzeichen: **PCT/EP02/05050**
- (22) Internationales Anmeldedatum:  
8. Mai 2002 (08.05.2002) (71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von US): **CARL ZEISS SEMICONDUCTOR MANUFACTURING TECHNOLOGIES AG** [DE/DE]; Carl Zeiss-Strasse 22, 73447 Oberkochen (DE).
- (25) Einreichungssprache: **Deutsch**
- (26) Veröffentlichungssprache: **Deutsch** (72) Erfinder; und (75) Erfinder/Anmelder (nur für US): **KRÄHMER, Daniel** [DE/DE]; Hegelstrasse 28, 73431 Aalen (DE). **GRUNER, Toralf** [DE/DE]; Faleska-Meinig-Strasse 128, 09122 Chemnitz (DE). **ULRICH, Wilhelm** [DE/DE]; Lederackerring 44, 73434 Aalen (DE). **ENKISCH, Birgit** [DE/DE]; Aalener Strasse 2a, 73447 Oberkochen (DE). **GERHARD, Michael** [DE/DE]; Bühlstrasse 4, 73432 Aalen (DE). **BRUNOTTE, Martin** [DE/DE]; Hegelstrasse
- (30) Angaben zur Priorität:
- |              |                            |    |
|--------------|----------------------------|----|
| 101 23 725.1 | 15. Mai 2001 (15.05.2001)  | DE |
| 101 23 727.8 | 15. Mai 2001 (15.05.2001)  | DE |
| 101 25 487.3 | 23. Mai 2001 (23.05.2001)  | DE |
| 101 27 320.7 | 6. Juni 2001 (06.06.2001)  | DE |
| 102 10 782.3 | 12. März 2002 (12.03.2002) | DE |

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: LENS SYSTEM CONSISTING OF FLUORIDE CRYSTAL LENSES

(54) Bezeichnung: OBJEKTIV MIT FLUORID-KRISTALL-LINSEN



(57) Abstract: A lens system, especially a projection lens system for a microlithographic projection illumination system, comprising at least one fluoride crystal lens. The disruptive influence of birefringence is reduced by using a lens which is a lens (100) with a lens axis which is approximately perpendicular in relation to the crystal planes {100} or the equivalent crystal planes of the fluoride crystal. In lens systems consisting of at least two fluoride crystal lenses, it is useful to arrange the fluoride crystal lenses in such a way that they are twisted in relation to each other. The lens axes of the fluoride crystal lenses can thus point in crystal direction (111) or (110), in addition to direction (100). It is also possible to reduce the disruptive influence of birefringence by using groups with twisted (100) lenses and groups with other twisted lenses (111) or other twisted (110) lenses. The disruptive influence of birefringence can be reduced further by providing the optical element with a compensating coating.

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]



47, 73431 Aalen (DE). **WAGNER, Christian** [DE/NL]; Steenstraat 131, NL-5521 KS Eersel (NL). **KAISER, Winfried** [DE/DE]; Fahrbachstrasse 150, 73431 Aalen (DE). **MAUL, Manfred** [DE/DE]; Elchweg 29, 73434 Aalen (DE). **ZACZEK, Christoph** [DE/DE]; Lauterner Strasse 37, 73540 Heubach (DE).

**Erklärung gemäß Regel 4.17:**

— *Erfindererklärung (Regel 4.17 Ziffer iv) nur für US*

**Veröffentlicht:**

— *ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu veröffentlichen nach Erhalt des Berichts*

(81) **Bestimmungsstaaten (national):** CN, DE, JP, KR, US.

(84) **Bestimmungsstaaten (regional):** europäisches Patent (AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE, TR).

*Zur Erklärung der Zweibuchstaben-Codes und der anderen Abkürzungen wird auf die Erklärungen ("Guidance Notes on Codes and Abbreviations") am Anfang jeder regulären Ausgabe der PCT-Gazette verwiesen.*

(57) **Zusammenfassung:** Objektiv, insbesondere Projektionsobjektiv für eine Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage mit mindestens einer Fluorid-Kristall-Linse. Eine Reduzierung des störenden Einflusses der Doppelbrechung erzielt man, wenn diese Linse eine (100)-Linse mit einer Linsenachse ist, welche annähernd senkrecht auf den {100}-Kristallebenen oder auf den dazu äquivalenten Kristallebenen des Fluorid-Kristalls steht. Bei Objektiven mit mindestens zwei Fluorid-Kristall-Linsen ist es günstig, wenn die Fluorid-Kristall-Linsen gegeneinander verdreht angeordnet sind. Die Linsenachsen der Fluorid-Kristall-Linsen können dabei neben der (100)-Kristallrichtung auch in die (111)-oder in die (110)-Kristallrichtung weisen. Eine weitere Reduzierung des störenden Einflusses der Doppelbrechung erzielt man durch den gleichzeitigen Einsatz von Gruppen mit gegeneinander verdrehten (100)-Linsen und Gruppen mit gegeneinander verdrehten (111)-Linsen oder (110)-Linsen. Eine weitere Reduzierung des störenden Einflusses der Doppelbrechung erzielt man durch die Belegung eines optischen Elements mit einer Kompensations-Beschichtung.

Beschreibung:

Objektiv mit Fluorid-Kristall-Linsen

- 5 Die Erfindung betrifft ein Objektiv nach dem Oberbegriff des Anspruchs 1.

Derartige Projektionsobjektive sind aus der US 6,201,634 bekannt. Dort ist offenbart, daß bei der Herstellung von Fluorid-Kristall-Linsen idealerweise die Linsenachsen senkrecht zu den {111}-Kristallebenen der Fluorid-Kristalle ausgerichtet werden, um die

- 10 Spannungsdoppelbrechung zu minimieren. Die US 6,201,634 geht dabei davon aus, daß Fluorid-Kristalle keine intrinsische Doppelbrechung aufweisen.

Aus der Internet-Publikation „Preliminary Determination of an Intrinsic Birefringence in CaF<sub>2</sub>“ von John H. Burnett, Eric L. Shirley, and Zachary H. Levine, NIST Gaithersburg

- 15 MD 20899 USA (verbreitet am 07.05.01) ist jedoch bekannt, daß Kalzium-Fluorid-Einkristalle auch nicht spannungsinduzierte, also intrinsische Doppelbrechung aufweisen. Die dort präsentierten Messungen zeigen, daß bei Strahlausbreitung in der <110>-Kristallrichtung eine Doppelbrechung von  $(6.5 \pm 0.4)$  nm/cm bei einer Wellenlänge von  $\lambda = 156.1$  nm, von  $(3.6 \pm 0.2)$  nm/cm bei einer Wellenlänge von  $\lambda = 193.09$  nm und von  $(1.2 \pm 0.1)$  nm/cm bei einer Wellenlänge von  $\lambda = 253.65$  nm für Kalzium-Fluorid auftritt. Bei einer Strahlausbreitung in der <100>-Kristallrichtung und in der <111>-Kristallrichtung weist Kalzium-Fluorid dagegen keine intrinsische Doppelbrechung auf, wie dies auch von der Theorie vorhergesagt wird. Die intrinsische Doppelbrechung ist somit stark richtungsabhängig und nimmt mit kleiner werdender Wellenlänge deutlich zu.

25

Die Indizierung der Kristallrichtungen wird im folgenden zwischen den Zeichen „<“ und „>“ angegeben, die Indizierung der Kristallebenen zwischen den Zeichen „{“ und „}“. Die Kristallrichtung gibt dabei immer die Richtung der Flächennormalen der entsprechenden Kristallebene an. So zeigt die Kristallrichtung <100> in Richtung der Flächennormalen der

30 Kristallebene {100}. Die kubischen Kristalle, zu denen die hier betrachteten Fluorid-



- Kristalle gehören, weisen die Hauptkristallrichtungen  $\langle 110 \rangle$ ,  $\langle \bar{1} 10 \rangle$ ,  $\langle \bar{1} 10 \rangle$ ,  $\langle \bar{1} \bar{1} 0 \rangle$ ,  $\langle 101 \rangle$ ,  $\langle 10 \bar{1} \rangle$ ,  $\langle \bar{1} 01 \rangle$ ,  $\langle \bar{1} 0 \bar{1} \rangle$ ,  $\langle 011 \rangle$ ,  $\langle 0 \bar{1} 1 \rangle$ ,  $\langle 01 \bar{1} \rangle$ ,  $\langle 0 \bar{1} \bar{1} \rangle$ ,  $\langle 111 \rangle$ ,  $\langle \bar{1} \bar{1} \bar{1} \rangle$ ,  $\langle \bar{1} \bar{1} 1 \rangle$ ,  $\langle \bar{1} 1 \bar{1} \rangle$ ,  $\langle 1 \bar{1} \bar{1} \rangle$ ,  $\langle \bar{1} 11 \rangle$ ,  $\langle 1 \bar{1} 1 \rangle$ ,  $\langle 11 \bar{1} \rangle$ ,  $\langle 100 \rangle$ ,  $\langle 010 \rangle$ ,  $\langle 001 \rangle$ ,  $\langle \bar{1} 00 \rangle$ ,  $\langle 0 \bar{1} 0 \rangle$  und  $\langle 00 \bar{1} \rangle$  auf. Die Hauptkristallrichtungen  $\langle 100 \rangle$ ,  $\langle 010 \rangle$ ,  $\langle 001 \rangle$ ,  $\langle \bar{1} 00 \rangle$ ,  $\langle 0 \bar{1} 0 \rangle$  und  $\langle 00 \bar{1} \rangle$  sind auf Grund der Symmetrieeigenschaften der kubischen Kristalle äquivalent zueinander, so daß im folgenden Kristallrichtungen, die in eine dieser Hauptkristallrichtungen weisen, das Präfix „(100)-“ erhalten. Kristallebenen, die senkrecht zu einer dieser Hauptkristallrichtungen stehen, erhalten entsprechend das Präfix „(100)-“.
- Die Hauptkristallrichtungen  $\langle 110 \rangle$ ,  $\langle \bar{1} 10 \rangle$ ,  $\langle \bar{1} 10 \rangle$ ,  $\langle \bar{1} \bar{1} 0 \rangle$ ,  $\langle 101 \rangle$ ,  $\langle 10 \bar{1} \rangle$ ,  $\langle \bar{1} 01 \rangle$ ,  $\langle \bar{1} 0 \bar{1} \rangle$ ,  $\langle 011 \rangle$ ,  $\langle 0 \bar{1} 1 \rangle$ ,  $\langle 01 \bar{1} \rangle$  und  $\langle 0 \bar{1} \bar{1} \rangle$  sind ebenso äquivalent zueinander, so daß im folgenden Kristallrichtungen, die in eine dieser Hauptkristallrichtungen weisen, das Präfix „(110)-“ erhalten. Kristallebenen, die senkrecht zu einer dieser Hauptkristallrichtungen stehen, erhalten entsprechend das Präfix „(110)-“. Die Hauptkristallrichtungen  $\langle 111 \rangle$ ,  $\langle \bar{1} \bar{1} \bar{1} \rangle$ ,  $\langle \bar{1} \bar{1} 1 \rangle$ ,  $\langle \bar{1} 1 \bar{1} \rangle$ ,  $\langle 1 \bar{1} \bar{1} \rangle$ ,  $\langle \bar{1} 11 \rangle$ ,  $\langle 1 \bar{1} 1 \rangle$  und  $\langle 11 \bar{1} \rangle$  sind ebenso äquivalent zueinander, so daß im folgenden Kristallrichtungen, die in eine dieser Hauptkristallrichtungen weisen, das Präfix „(111)-“ erhalten. Kristallebenen, die senkrecht zu einer dieser Hauptkristallrichtungen stehen, erhalten entsprechend das Präfix „(111)-“. Aussagen, die im folgenden zu einer der zuvor genannten Hauptkristallrichtungen getroffen werden, gelten immer auch für die äquivalenten Hauptkristallrichtungen.

- Projektionsobjektive und Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlagen sind beispielsweise aus der Patentanmeldung PCT/EP00/13148 (WO 150171 A1) der Anmelderin und den darin zitierten Schriften bekannt. Die Ausführungsbeispiele dieser Anmeldung zeigen geeignete rein refraktive und katadioptrische Projektionsobjektive mit numerischen Aperturen von 0.8 und 0.9, bei einer Betriebswellenlänge von 193nm sowie 157 nm.

Die Drehung von Linsenelementen zur Kompensation von Doppelbrechungseffekten ist auch in der Patentanmeldung „Projektionsbelichtungsanlage der Mikrolithographie, Optisches System und Herstellverfahren“ (DE 10123725.1) mit dem Aktenzeichen des Anmelders 01055P und dem Einreichungstag 15.05.2001 beschrieben. Der Inhalt dieser

5 Anmeldung soll auch Teil der vorliegenden Anmeldung sein.

Aufgabe der Erfindung ist es, Projektionsobjektive für eine Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage anzugeben, bei denen der Einfluß der Doppelbrechung, insbesondere der intrinsischen Doppelbrechung wesentlich reduziert ist.

10

Gelöst wird diese Aufgabe mit einem Objektiv gemäß Anspruch 1, 8, 32, 67, 68 und 93, einer Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage gemäß Anspruch 49, einem Verfahren zur Herstellung von Halbleiterbauelementen gemäß Anspruch 50, einem Verfahren zur Herstellung von Objektiven gemäß Anspruch 51, einem Verfahren zur

15 Kompensation von Doppelbrechungseffekten gemäß Anspruch 55, einem Linsenherstellverfahren gemäß Anspruch 56, 82 und 83, einem Verfahren zur Herstellung eines optischen Rohlings gemäß Anspruch 69 und einem mit diesem Verfahren hergestellten optischen Rohling nach Anspruch 80.

20 Vorteilhafte Ausgestaltungen der Erfindung ergeben sich aus den Merkmalen der abhängigen Ansprüche.

Um den Einfluss der intrinsischen Doppelbrechung zu minimieren, schlägt Anspruch 1 vor, bei Linsen aus Fluorid-Kristall die Linsenachsen so auszurichten, daß sie mit der  $\langle 100 \rangle$ -

25 Kristallrichtung zusammenfallen. Die Linsenachsen fallen dann mit einer Hauptkristallrichtung zusammen, wenn die maximale Abweichung zwischen Linsenachse und Hauptkristallrichtung kleiner  $5^\circ$  ist. Dabei müssen nicht alle Fluorid-Kristall-Linsen des Objektives eine derartige Ausrichtung der Kristallebenen aufweisen. Diejenigen Linsen, bei denen die Linsenachsen senkrecht auf den  $\{100\}$ -Kristallebenen stehen, werden im

30 Folgenden auch als  $\{100\}$ -Linsen bezeichnet. Die Ausrichtung der Linsenachse in  $\langle 100 \rangle$ -

WO02093209

**Title:**  
**LENS SYSTEM CONSISTING OF FLUORIDE CRYSTAL LENSES**

**Abstract:**

A lens system, especially a projection lens system for a microlithographic projection illumination system, comprising at least one fluoride crystal lens. The disruptive influence of birefringence is reduced by using a lens which is a lens (100) with a lens axis which is approximately perpendicular in relation to the crystal planes {100} or the equivalent crystal planes of the fluoride crystal. In lens systems consisting of at least two fluoride crystal lenses, it is useful to arrange the fluoride crystal lenses in such a way that they are twisted in relation to each other. The lens axes of the fluoride crystal lenses can thus point in crystal direction (111) or (110), in addition to direction (100). It is also possible to reduce the disruptive influence of birefringence by using groups with twisted (100) lenses and groups with other twisted lenses (111) or other twisted (110) lenses. The disruptive influence of birefringence can be reduced further by providing the optical element with a compensating coating.

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES  
PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum  
Internationales Büro



(43) Internationales Veröffentlichungsdatum  
21. November 2002 (21.11.2002)

PCT

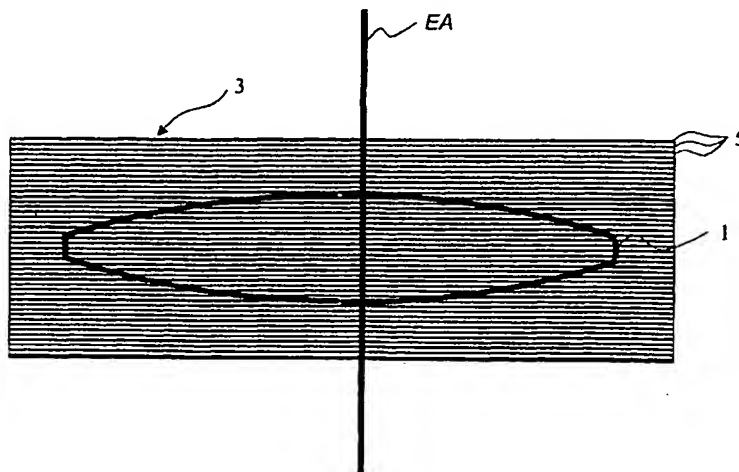
(10) Internationale Veröffentlichungsnummer  
**WO 02/093209 A2**

- (51) Internationale Patentklassifikation<sup>7</sup>: **G02B 3/00** (71) Anmelder (nur für AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE, TR): **CARL ZEISS [DE/DE]; 89518 Heidenheim (Brenz) (DE).**
- (21) Internationales Aktenzeichen: **PCT/EP02/05050**
- (22) Internationales Anmeldedatum:  
8. Mai 2002 (08.05.2002) (71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von US): **CARL ZEISS SEMICONDUCTOR MANUFACTURING TECHNOLOGIES AG [DE/DE]; Carl Zeiss-Strasse 22, 73447 Oberkochen (DE).**
- (25) Einreichungssprache: **Deutsch**
- (26) Veröffentlichungssprache: **Deutsch** (72) Erfinder; und (75) Erfinder/Anmelder (nur für US): **KRÄHMER, Daniel [DE/DE]; Hegelstrasse 28, 73431 Aalen (DE). GRÜNER, Toralf [DE/DE]; Faleska-Meinig-Strasse 128, 09122 Chemnitz (DE). ULRICH, Wilhelm [DE/DE]; Lederackerring 44, 73434 Aalen (DE). ENKISCH, Birgit [DE/DE]; Aalener Strasse 2a, 73447 Oberkochen (DE). GERHARD, Michael [DE/DE]; Bühlstrasse 4, 73432 Aalen (DE). BRUNOTTE, Martin [DE/DE]; Hegelstrasse**
- (30) Angaben zur Priorität:
- |              |                            |    |
|--------------|----------------------------|----|
| 101 23 725.1 | 15. Mai 2001 (15.05.2001)  | DE |
| 101 23 727.8 | 15. Mai 2001 (15.05.2001)  | DE |
| 101 25 487.3 | 23. Mai 2001 (23.05.2001)  | DE |
| 101 27 320.7 | 6. Juni 2001 (06.06.2001)  | DE |
| 102 10 782.3 | 12. März 2002 (12.03.2002) | DE |

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: **LENS SYSTEM CONSISTING OF FLUORIDE CRYSTAL LENSES**

(54) Bezeichnung: **OBJEKTIV MIT FLUORID-KRISTALL-LINSEN**



(57) Abstract: A lens system, especially a projection lens system for a microlithographic projection illumination system, comprising at least one fluoride crystal lens. The disruptive influence of birefringence is reduced by using a lens which is a lens (100) with a lens axis which is approximately perpendicular in relation to the crystal planes {100} or the equivalent crystal planes of the fluoride crystal. In lens systems consisting of at least two fluoride crystal lenses, it is useful to arrange the fluoride crystal lenses in such a way that they are twisted in relation to each other. The lens axes of the fluoride crystal lenses can thus point in crystal direction (111) or (110), in addition to direction (100). It is also possible to reduce the disruptive influence of birefringence by using groups with twisted (100) lenses and groups with other twisted lenses (111) or other twisted (110) lenses. The disruptive influence of birefringence can be reduced further by providing the optical element with a compensating coating.

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]



47, 73431 Aalen (DE). **WAGNER, Christian** [DE/NL]; Steenstraat 131, NL-5521 KS Eersel (NL). **KAISER, Winfried** [DE/DE]; Fahrbachstrasse 150, 73431 Aalen (DE). **MAUL, Manfred** [DE/DE]; Elchweg 29, 73434 Aalen (DE). **ZACZEK, Christoph** [DE/DE]; Lauterner Strasse 37, 73540 Heubach (DE).

**Erklärung gemäß Regel 4.17:**

— *Erfindererklärung (Regel 4.17 Ziffer iv) nur für US*

**Veröffentlicht:**

— *ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu veröffentlichen nach Erhalt des Berichts*

(81) **Bestimmungsstaaten (national):** CN, DE, JP, KR, US.

(84) **Bestimmungsstaaten (regional):** europäisches Patent (AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SR, TR).

*Zur Erklärung der Zweibuchstaben-Codes und der anderen Abkürzungen wird auf die Erklärungen ("Guidance Notes on Codes and Abbreviations") am Anfang jeder regulären Ausgabe der PCT-Gazette verwiesen.*

(57) **Zusammenfassung:** Objektiv, insbesondere Projektionsobjektiv für eine Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage mit mindestens einer Fluorid-Kristall-Linse. Eine Reduzierung des störenden Einflusses der Doppelbrechung erzielt man, wenn diese Linse eine (100)-Linse mit einer Linsenachse ist, welche annähernd senkrecht auf den {100}-Kristallebenen oder auf den dazu äquivalenten Kristallebenen des Fluorid-Kristalls steht. Bei Objektiven mit mindestens zwei Fluorid-Kristall-Linsen ist es günstig, wenn die Fluorid-Kristall-Linsen gegeneinander verdreht angeordnet sind. Die Linsenachsen der Fluorid-Kristall-Linsen können dabei neben der (100)-Kristallrichtung auch in die (111)-oder in die (110)-Kristallrichtung weisen. Eine weitere Reduzierung des störenden Einflusses der Doppelbrechung erzielt man durch den gleichzeitigen Einsatz von Gruppen mit gegeneinander verdrehten (100)-Linsen und Gruppen mit gegeneinander verdrehten (111)-Linsen oder (110)-Linsen. Eine weitere Reduzierung des störenden Einflusses der Doppelbrechung erzielt man durch die Belegung eines optischen Elements mit einer Kompensations-Beschichtung.

Beschreibung:

Objektiv mit Fluorid-Kristall-Linsen

- 5 Die Erfindung betrifft ein Objektiv nach dem Oberbegriff des Anspruchs 1.

Derartige Projektionsobjektive sind aus der US 6,201,634 bekannt. Dort ist offenbart, daß bei der Herstellung von Fluorid-Kristall-Linsen idealerweise die Linsenachsen senkrecht zu den {111}-Kristallebenen der Fluorid-Kristalle ausgerichtet werden, um die

- 10 Spannungsdoppelbrechung zu minimieren. Die US 6,201,634 geht dabei davon aus, daß Fluorid-Kristalle keine intrinsische Doppelbrechung aufweisen.

Aus der Internet-Publikation „Preliminary Determination of an Intrinsic Birefringence in CaF<sub>2</sub>“ von John H. Burnett, Eric L. Shirley, and Zachary H. Levine, NIST Gaithersburg

- 15 MD 20899 USA (verbreitet am 07.05.01) ist jedoch bekannt, daß Kalzium-Fluorid-Einkristalle auch nicht spannungsinduzierte, also intrinsische Doppelbrechung aufweisen. Die dort präsentierten Messungen zeigen, daß bei Strahlausbreitung in der  $\langle 110 \rangle$ -Kristallrichtung eine Doppelbrechung von  $(6.5 \pm 0.4)$  nm/cm bei einer Wellenlänge von  $\lambda = 156.1$  nm, von  $(3.6 \pm 0.2)$  nm/cm bei einer Wellenlänge von  $\lambda = 193.09$  nm und von  $(1.2 \pm 0.1)$  nm/cm bei einer Wellenlänge von  $\lambda = 253.65$  nm für Kalzium-Fluorid auftritt. Bei einer Strahlausbreitung in der  $\langle 100 \rangle$ -Kristallrichtung und in der  $\langle 111 \rangle$ -Kristallrichtung weist Kalzium-Fluorid dagegen keine intrinsische Doppelbrechung auf, wie dies auch von der Theorie vorhergesagt wird. Die intrinsische Doppelbrechung ist somit stark richtungsabhängig und nimmt mit kleiner werdender Wellenlänge deutlich zu.

25

Die Indizierung der Kristallrichtungen wird im folgenden zwischen den Zeichen „<“ und „>“ angegeben, die Indizierung der Kristallebenen zwischen den Zeichen „{“ und „}“. Die Kristallrichtung gibt dabei immer die Richtung der Flächennormalen der entsprechenden Kristallebene an. So zeigt die Kristallrichtung  $\langle 100 \rangle$  in Richtung der Flächennormalen der

30 Kristallebene {100}. Die kubischen Kristalle, zu denen die hier betrachteten Fluorid-

- Kristalle gehören, weisen die Hauptkristallrichtungen  $\langle 110 \rangle$ ,  $\langle \bar{1} 10 \rangle$ ,  $\langle \bar{1} 10 \rangle$ ,  $\langle \bar{1} \bar{1} 0 \rangle$ ,  $\langle 101 \rangle$ ,  $\langle 10 \bar{1} \rangle$ ,  $\langle \bar{1} 01 \rangle$ ,  $\langle \bar{1} 0 \bar{1} \rangle$ ,  $\langle 011 \rangle$ ,  $\langle 0 \bar{1} 1 \rangle$ ,  $\langle 01 \bar{1} \rangle$ ,  $\langle 0 \bar{1} \bar{1} \rangle$ ,  $\langle 111 \rangle$ ,  $\langle \bar{1} \bar{1} \bar{1} \rangle$ ,  $\langle \bar{1} \bar{1} 1 \rangle$ ,  $\langle \bar{1} 1 \bar{1} \rangle$ ,  $\langle 1 \bar{1} \bar{1} \rangle$ ,  $\langle \bar{1} 11 \rangle$ ,  $\langle 1 \bar{1} 1 \rangle$ ,  $\langle 11 \bar{1} \rangle$ ,  $\langle 100 \rangle$ ,  $\langle 010 \rangle$ ,  $\langle 001 \rangle$ ,  $\langle \bar{1} 00 \rangle$ ,  $\langle 0 \bar{1} 0 \rangle$  und  $\langle 00 \bar{1} \rangle$  auf. Die Hauptkristallrichtungen  $\langle 100 \rangle$ ,  $\langle 010 \rangle$ ,  $\langle 001 \rangle$ ,  $\langle \bar{1} 00 \rangle$ ,  $\langle 0 \bar{1} 0 \rangle$  und  $\langle 00 \bar{1} \rangle$  sind auf Grund der Symmetrieeigenschaften der kubischen Kristalle äquivalent zueinander, so daß im folgenden Kristallrichtungen, die in eine dieser Hauptkristallrichtungen weisen, das Präfix „(100)-“ erhalten. Kristallebenen, die senkrecht zu einer dieser Hauptkristallrichtungen stehen, erhalten entsprechend das Präfix „(100)-“.
- Die Hauptkristallrichtungen  $\langle 110 \rangle$ ,  $\langle \bar{1} 10 \rangle$ ,  $\langle \bar{1} 10 \rangle$ ,  $\langle \bar{1} \bar{1} 0 \rangle$ ,  $\langle 101 \rangle$ ,  $\langle 10 \bar{1} \rangle$ ,  $\langle \bar{1} 01 \rangle$ ,  $\langle \bar{1} 0 \bar{1} \rangle$ ,  $\langle 011 \rangle$ ,  $\langle 0 \bar{1} 1 \rangle$ ,  $\langle 01 \bar{1} \rangle$  und  $\langle 0 \bar{1} \bar{1} \rangle$  sind ebenso äquivalent zueinander, so daß im folgenden Kristallrichtungen, die in eine dieser Hauptkristallrichtungen weisen, das Präfix „(110)-“ erhalten. Kristallebenen, die senkrecht zu einer dieser Hauptkristallrichtungen stehen, erhalten entsprechend das Präfix „(110)-“. Die Hauptkristallrichtungen  $\langle 111 \rangle$ ,  $\langle \bar{1} \bar{1} \bar{1} \rangle$ ,  $\langle \bar{1} \bar{1} 1 \rangle$ ,  $\langle \bar{1} 1 \bar{1} \rangle$ ,  $\langle 1 \bar{1} \bar{1} \rangle$ ,  $\langle \bar{1} 11 \rangle$ ,  $\langle 1 \bar{1} 1 \rangle$  und  $\langle 11 \bar{1} \rangle$  sind ebenso äquivalent zueinander, so daß im folgenden Kristallrichtungen, die in eine dieser Hauptkristallrichtungen weisen, das Präfix „(111)-“ erhalten. Kristallebenen, die senkrecht zu einer dieser Hauptkristallrichtungen stehen, erhalten entsprechend das Präfix „(111)-“. Aussagen, die im folgenden zu einer der zuvor genannten Hauptkristallrichtungen getroffen werden, gelten immer auch für die äquivalenten Hauptkristallrichtungen.

- Projektionsobjektive und Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlagen sind beispielsweise aus der Patentanmeldung PCT/EP00/13148 (WO 150171 A1) der Anmelderin und den darin zitierten Schriften bekannt. Die Ausführungsbeispiele dieser
- Anmeldung zeigen geeignete rein refraktive und katadioptrische Projektionsobjektive mit numerischen Aperturen von 0.8 und 0.9, bei einer Betriebswellenlänge von 193nm sowie 157 nm.

Die Drehung von Linsenelementen zur Kompensation von Doppelbrechungseffekten ist auch in der Patentanmeldung „Projektionsbelichtungsanlage der Mikrolithographie, Optisches System und Herstellverfahren“ (DE 10123725.1) mit dem Aktenzeichen des Anmelders 01055P und dem Einreichungstag 15.05.2001 beschrieben. Der Inhalt dieser

5 Anmeldung soll auch Teil der vorliegenden Anmeldung sein.

Aufgabe der Erfindung ist es, Projektionsobjektive für eine Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage anzugeben, bei denen der Einfluß der Doppelbrechung, insbesondere der intrinsischen Doppelbrechung wesentlich reduziert ist.

10

Gelöst wird diese Aufgabe mit einem Objektiv gemäß Anspruch 1, 8, 32, 67, 68 und 93, einer Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage gemäß Anspruch 49, einem Verfahren zur Herstellung von Halbleiterbauelementen gemäß Anspruch 50, einem Verfahren zur Herstellung von Objektiven gemäß Anspruch 51, einem Verfahren zur

15 Kompensation von Doppelbrechungseffekten gemäß Anspruch 55, einem Linsenherstellverfahren gemäß Anspruch 56, 82 und 83, einem Verfahren zur Herstellung eines optischen Rohlings gemäß Anspruch 69 und einem mit diesem Verfahren hergestellten optischen Rohling nach Anspruch 80.

20 Vorteilhafte Ausgestaltungen der Erfindung ergeben sich aus den Merkmalen der abhängigen Ansprüche.

Um den Einfluss der intrinsischen Doppelbrechung zu minimieren, schlägt Anspruch 1 vor, bei Linsen aus Fluorid-Kristall die Linsenachsen so auszurichten, daß sie mit der  $\langle 100 \rangle$ -

25 Kristallrichtung zusammenfallen. Die Linsenachsen fallen dann mit einer Hauptkristallrichtung zusammen, wenn die maximale Abweichung zwischen Linsenachse und Hauptkristallrichtung kleiner  $5^\circ$  ist. Dabei müssen nicht alle Fluorid-Kristall-Linsen des Objektives eine derartige Ausrichtung der Kristallebenen aufweisen. Diejenigen Linsen, bei denen die Linsenachsen senkrecht auf den  $\{100\}$ -Kristallebenen stehen, werden im

30 Folgenden auch als (100)-Linsen bezeichnet. Die Ausrichtung der Linsenachse in  $\langle 100 \rangle$ -



Kristallrichtung hat den Vorteil, daß sich der störende Einfluss der intrinsischen Doppelbrechung, der sich bei Lichtausbreitung in  $\langle 110 \rangle$ -Kristallrichtung ergibt, erst bei höheren Öffnungswinkeln der Lichtstrahlen bemerkbar macht als für eine Ausrichtung der Linsenachse in  $\langle 111 \rangle$ -Kristallrichtung. Unter Öffnungswinkel versteht man in diesem

5 Zusammenhang den Winkel zwischen einem Lichtstrahl und der optischen Achse außerhalb einer Linse und zwischen dem Lichtstrahl und der Linsenachse innerhalb einer Linse. Erst wenn die Öffnungswinkel in den Bereich des Winkels zwischen der  $\langle 100 \rangle$ -Kristallrichtung und der  $\langle 110 \rangle$ -Kristallrichtung kommen, spüren die entsprechenden Lichtstrahlen den Einfluss der Doppelbrechung. Der Winkel zwischen der  $\langle 110 \rangle$ -

10 Kristallrichtung und der  $\langle 100 \rangle$ -Kristallrichtung beträgt dabei  $45^\circ$ . Wäre die Linsenachse dagegen in  $\langle 111 \rangle$ -Kristallrichtung ausgerichtet, so würde sich der störende Einfluss der intrinsischen Doppelbrechung schon bei kleineren Öffnungswinkeln bemerkbar machen, da der Winkel zwischen der  $\langle 110 \rangle$ -Kristallrichtung und der  $\langle 111 \rangle$ -Kristallrichtung nur  $35^\circ$  beträgt.

15 Wird die Winkelabhängigkeit der Doppelbrechung beispielsweise durch das Herstellverfahren des Fluorid-Kristalls oder die mechanische Beanspruchung der Linse, insbesondere Spannungsdoppelbrechung, hervorgerufen, so können die offenbarten Lösungsansätze selbstverständlich ebenfalls zur Reduzierung des störenden Einflusses der

20 Doppelbrechung angewendet werden.

Die Linsenachse ist dabei beispielsweise durch eine Symmetrieachse einer rotationssymmetrischen Linse gegeben. Weist die Linse keine Symmetrieachse auf, so kann die Linsenachse durch die Mitte eines einfallenden Strahlbündels oder durch eine Gerade

25 gegeben sein, bezüglich der die Strahlwinkel aller Lichtstrahlen innerhalb der Linse minimal sind. Als Linsen kommen beispielsweise refraktive oder diffraktive Linsen sowie Korrekturplatten mit Freiformkorrekturflächen in Frage. Auch Planplatten werden als Linsen angesehen, sofern sie im Strahlengang des Objektivs angeordnet sind. Die Linsenachse einer Planplatte steht dabei senkrecht auf den planen Linsenoberflächen.

30

Vorzugsweise handelt es sich jedoch bei den Linsen um rotationssymmetrische Linsen.

Objektive weisen eine optische Achse auf, welche von der Objektebene zur Bildebene verläuft. Vorzugsweise sind die (100)-Linsen zentriert um diese optische Achse aufgebaut,  
 5 so daß auch die Linsenachsen mit der optischen Achse zusammenfallen.

Vorteilhaft läßt sich die Erfindung bei Projektionsobjektiven für eine Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage einsetzen, da für diese Objektive extrem hohe Anforderungen an das Auflösungsvermögen gestellt werden. Aber auch bei Prüfobjektiven, mit denen  
 10 beispielsweise Linsen für Projektionsobjektive durch Vermessung von Wellenfronten mit großer Öffnung getestet werden, wirkt sich der Einfluß der Doppelbrechung störend aus.

Bei Objektiven mit großen bildseitigen numerischen Aperturen, insbesondere größer 0.7, treten innerhalb der (100)- Linsen Öffnungswinkel auf, die größer als 25°, insbesondere  
 15 größer als 30° sind. Gerade bei diesen großen Öffnungswinkeln kommt die Erfindung zum Tragen, die Linsenachsen in <100>-Kristallrichtung zu orientieren. Wären die Linsenachsen in <111>-Kristallrichtung orientiert, so würden die Lichtstrahlen mit Öffnungswinkeln größer als 25°, insbesondere größer als 30° deutlicher den störenden Einfluß der Doppelbrechung spüren, wenn nicht eine der weiter unten beschriebenen  
 20 Korrektionsmaßnahmen angewandt wird.

Da andererseits der störende Einfluß der intrinsischen Doppelbrechung bei einem Öffnungswinkel von 45° maximal werden kann, ist es vorteilhaft, das Projektionsobjektiv so auszulegen, daß alle Öffnungswinkel der Lichtstrahlen kleiner 45° sind, insbesondere  
 25 kleiner gleich  $\arcsin\left(\frac{NA}{n_{FK}}\right)$  sind, wobei NA die bildseitige numerische Apertur bezeichnet

und  $n_{FK}$  die Brechzahl des Fluorid-Kristalls. Der Ausdruck  $\arcsin\left(\frac{NA}{n_{FK}}\right)$  gibt dabei den Öffnungswinkel an, welcher der bildseitigen numerischen Apertur innerhalb einer Fluorid-Kristall-Linse entspricht, wenn der Lichtstrahl an einer planen Grenzfläche gebrochen

wird. Dies wird erreicht, indem die Linsen, die nahe an der Bildebene angeordnet sind, sammelnde Linsenflächen, plane Linsenflächen oder höchstens leicht zerstreuliche Linsenflächen aufweisen, wenn in Lichtrichtung nach der zerstreulichen Linsenfläche eine stärker sammelnde Linsenfläche folgt.

5

Große Öffnungswinkel treten hauptsächlich bei Linsen in der Nähe von Feldebene, insbesondere der Bildebene auf. Die (100)-Linsen sollten deshalb vorzugsweise im Bereich der Feldebene eingesetzt werden. Der Bereich, in dem die (100)-Linsen eingesetzt werden sollten, lässt sich über das Verhältnis der Linsendurchmessers zum Durchmesser der Blende bestimmen. So beträgt der Linsendurchmesser der (100)-Linsen vorzugsweise maximal 85%, insbesondere maximal 80% des Blendendurchmessers.

10

Bei Projektionsobjektiven treten die größten Öffnungswinkel in der Regel in der Bildebene am nächsten gelegenen Linse auf. Deshalb wird vorzugsweise bei dieser Linse die Linsenachse in Richtung der  $\langle 100 \rangle$ -Kristallrichtung ausgerichtet.

15

Die intrinsische Doppelbrechung einer Fluorid-Kristall-Linse ist dabei nicht nur vom Öffnungswinkel eines Lichtstrahls, sondern auch vom Azimutwinkel des Lichtstrahls abhängig. So kann jeder Fluorid-Kristall-Linse eine Doppelbrechungsverteilung  $\Delta n(\alpha_L, \theta_L)$  zugeordnet werden, die einerseits eine Funktion des Öffnungswinkels  $\theta_L$  und andererseits eine Funktion des Azimutwinkels  $\alpha_L$  ist. Der Wert der Doppelbrechung  $\Delta n$  gibt dabei für eine durch den Öffnungswinkel  $\theta_L$  und den Azimutwinkel  $\alpha_L$  bestimmte Strahlrichtung das Verhältnis des optischen Wegunterschied für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände zum im Fluorid-Kristall zurückgelegten physikalischen Strahlweg in der Einheit [nm/cm] an. Die intrinsische Doppelbrechung ist somit von den Strahlwegen und der Linsenform unabhängig. Den optischen Wegunterschied für einen Strahl erhält man entsprechend durch Multiplikation der Doppelbrechung mit dem zurückgelegten Strahlweg. Der Öffnungswinkel  $\theta_L$  wird zwischen der Strahlrichtung und der Linsenachse bestimmt, der Azimutwinkel  $\alpha_L$  zwischen der in die zur Linsenachse senkrecht stehenden

20

25

Kristallebene projizierten Strahlrichtung und einer mit der Linse fest verknüpften Bezugsrichtung.

- Die Winkelabhängigkeit der Doppelbrechungsverteilungen der einzelnen Fluorid-Kristall-
- 5 Linsen führt dazu, daß die Strahlen eines Strahlbüschels, das in der Bildebene des Objektivs auf einen Bildpunkt trifft, winkelabhängige optische Wegunterschiede  $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$  für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände erfahren. Die optischen Wegunterschiede  $\Delta OPL$  werden dabei in Abhängigkeit des Öffnungswinkels  $\theta_R$  und des Azimutwinkel  $\alpha_R$  angegeben. Der Öffnungswinkel  $\theta_R$  eines Strahls wird dabei
- 10 zwischen der Strahlrichtung und der optischen Achse in der Bildebene, der Azimutwinkel  $\alpha_R$  zwischen der in die Bildebene projizierten Strahlrichtung und einer festen Bezugsrichtung innerhalb der Bildebene bestimmt. Weist nun das Objektiv mindestens zwei Linsen oder Linsenteile aus Fluorid-Kristall auf, so ist es vorteilhaft, wenn die Linsenachsen dieser Linsen oder Linsenteile in eine Hauptkristallrichtung weisen und die
- 15 Linsen oder Linsenteile derart gegeneinander um die Linsenachsen verdreht angeordnet sind, daß die Verteilung  $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$  der optischen Wegunterschiede wesentlich reduzierte Werte im Vergleich zu einer Anordnung aufweist, bei der die Linsenachsen in die gleiche Hauptkristallrichtung weisen und die Linsen oder Linsenteile gleich orientiert eingebaut sind. Da die Doppelbrechungsverteilungen der Linsen jedoch eine azimutale
- 20 Abhängigkeit aufweisen, kann durch die verdrehte Anordnung der Linsen der Maximalwert der Verteilung  $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$  um bis zu 20%, insbesondere um bis zu 25% im Vergleich zu einem gleich orientierten Einbau reduziert werden.

- Unter Linsenteilen sind beispielsweise einzelne Linsen zu verstehen, die durch Ansprengen
- 25 optisch nahtlos zu einer einzelnen Linse gefügt werden. Ganz allgemein bezeichnen Linsenteile die Bausteine einer einzelnen Linse, wobei die Linsenachsen der Linsenteile jeweils in Richtung der Linsenachse der einzelnen Linse weisen.

- Durch den verdrehten Einbau der Fluorid-Kristall-Linsen kann insbesondere die Abhängigkeit der Verteilung  $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$  vom Azimutwinkel  $\alpha_R$  deutlich reduziert werden, so daß sich eine nahezu rotationssymmetrische Verteilung  $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$  ergibt. Je nach Azimutwinkel  $\alpha_R$  sollen die optischen Wegdifferenzen vorteilhafterweise für den
- 5 gleichen Öffnungswinkel  $\theta_R$  um maximal 30%, insbesondere um maximal 20% bezogen auf den Maximalwert der Verteilung  $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$  variieren.

- Zeigt die Linsenachse in eine Hauptkristallrichtung, so weist die Doppelbrechungsverteilung  $\Delta n(\alpha_L, \theta_L)$  der Linse eine k-zählige Azimutalsymmetrie auf.
- 10 Beispielsweise zeigt die Doppelbrechungsverteilung einer (100)-Linse, bei der die Linsenachse in  $\langle 100 \rangle$ -Kristallrichtung weist, eine 4-zählige Azimutalsymmetrie, die Doppelbrechungsverteilung einer (111)-Linse, bei der die Linsenachse in  $\langle 111 \rangle$ -Kristallrichtung weist, eine 3-zählige Azimutalsymmetrie, und die Doppelbrechungsverteilung einer (110)-Linse, bei der die Linsenachse in  $\langle 110 \rangle$ -
- 15 Kristallrichtung weist, eine 2-zählige Azimutalsymmetrie. Je nach der Zähligkeit der Azimutalsymmetrie werden nun die einzelnen Linsen oder Linsenteile einer Gruppe um vorgegebene Drehwinkel  $\gamma$  gegeneinander um die Linsenachsen verdreht angeordnet. Die Drehwinkel  $\gamma$  werden dabei zwischen den Bezugsrichtungen von je zwei Linsen oder Linsenteilen bestimmt oder gemessen. Für die Linsen einer Gruppe weisen die
- 20 Linsenachsen in die gleiche Hauptkristallrichtung oder eine dazu äquivalente Hauptkristallrichtung. Die Bezugsrichtungen der Linsen einer Gruppe sind so mit den Linsen verknüpft, daß die Doppelbrechungsverteilungen  $\Delta n(\alpha_L, \theta_0)$  für einen vorgegebenen Öffnungswinkel  $\theta_0$  den gleichen azimutalen Verlauf aufweisen. Somit treten für alle Linsen einer Gruppe die azimutalen Bereiche mit maximaler Doppelbrechung bei den gleichen
- 25 Azimutwinkeln auf. Für n Linsen einer Gruppe sind die Drehwinkel zwischen je zwei Linsen folgendermaßen gegeben:

$$\gamma = \frac{360^\circ}{k \cdot n} + m \cdot \frac{360^\circ}{k} \pm 10^\circ$$

- k gibt dabei die Zähligkeit der Azimutalsymmetrie, n die Zahl der Linsen einer Gruppe und m eine beliebige ganze Zahl an. Die Toleranz von  $\pm 10^\circ$  berücksichtigt die Tatsache, daß unter Umständen die Drehwinkel von den theoretisch idealen Winkeln abweichen, um andere Randbedingungen bei der Objektivjustage berücksichtigen zu können. Eine
- 5 Abweichung vom idealen Drehwinkel führt zu einem nicht optimalen azimutalen Ausgleich der optischen Wegunterscheide der Linsen einer Gruppe. Dies kann jedoch in gewissen Grenzen toleriert werden.

Für (100)-Linsen ergibt sich somit folgende Vorgabe für die Drehwinkel:

$$\gamma = \frac{90^\circ}{n} + m \cdot 90^\circ \pm 10^\circ.$$

- 10 Umfasst die Gruppe zwei (100)-Linsen, so beträgt der Drehwinkel zwischen diesen beiden Linsen idealerweise  $45^\circ$ , beziehungsweise  $135^\circ$ ,  $225^\circ$ ...

Für (111)-Linsen ergibt sich somit folgende Vorgabe für die Drehwinkel:

$$\gamma = \frac{120^\circ}{n} + m \cdot 120^\circ \pm 10^\circ.$$

Für (110)-Linsen ergibt sich somit folgende Vorgabe für die Drehwinkel:

15 
$$\gamma = \frac{180^\circ}{n} + m \cdot 180^\circ \pm 10^\circ.$$

- Die Verteilung der optischen Wegunterschiede  $\Delta OPL_G(\alpha_R, \theta_R)$  kann dabei aber auch für den Einfluß einer einzelnen Gruppe von Linsen angegeben werden, indem nur diese Linsen bei der Doppelbrechungsauswertung betrachtet werden und die anderen Linsen als nicht
- 20 doppelbrechend angenommen werden.

- Die Linsen einer Gruppe werden beispielsweise dadurch bestimmt, daß ein äußerster Aperturstrahl eines Strahlenbüschels innerhalb dieser Linsen jeweils ähnliche Öffnungswinkel aufweist. Vorteilhafterweise variieren die Öffnungswinkel um maximal
- 25 30%, insbesondere um maximal 20% bezogen auf den maximalen Öffnungswinkel innerhalb der Linsen dieser Gruppe. Dabei sind die Öffnungswinkel des äußersten Aperturstrahls innerhalb dieser Linsen vorteilhafterweise größer  $15^\circ$ , insbesondere größer  $20^\circ$ . Als äußerster Aperturstrahl wird ein Strahl bezeichnet, der von einem Objektpunkt

- ausgeht, dessen Strahlhöhe in der Blendenebene dem Radius der Blende entspricht und der somit in der Bildebene einen Winkel gemäß der bildseitigen numerischen Apertur aufweist. Die äußersten Aperturstrahlen werden deshalb zur Definition der Gruppen herangezogen, weil sie üblicherweise innerhalb der Linsen die größten Öffnungswinkel aufweisen und
- 5 damit die größte Störung durch die Doppelbrechung erfahren. Die Bestimmung der optischen Wegdifferenz für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände für die äußersten Aperturstrahlen ermöglicht somit Aussagen über die maximale Störung einer Wellenfront durch die Doppelbrechung.
- 10 Weiterhin ist es vorteilhaft, wenn der äußerste Aperturstrahl in diesen Linsen jeweils einen ähnlich großen Strahlweg zurückgelegt. Vorteilhafterweise variieren die Strahlwege maximal um 30%, insbesondere maximal um 20% bezogen auf den maximalen Strahlweg innerhalb der Linsen dieser Gruppe. Durch diese Maßnahmen ergibt sich ein guter Ausgleich der azimuthalen Beiträge zur Verteilung der optischen Wegdifferenzen, die von
- 15 den einzelnen Linsen einer Gruppe hervorgerufen werden, so daß die resultierende Verteilung der optischen Wegdifferenzen nahezu rotationssymmetrisch ist.

- Weiterhin ist es vorteilhaft, wenn der äußerste Aperturstrahl in jeder Linse einer Gruppe bei gleicher Orientierung der Linsen ähnlich große optische Wegunterschiede für zwei
- 20 zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände erfährt. Vorteilhafterweise variieren die optischen Wegunterschiede maximal um 30%, insbesondere maximal um 20% bezogen auf den maximalen optischen Wegunterschied innerhalb der Linsen dieser Gruppe. Ist diese Bedingung erfüllt, tritt bei verdrehter Anordnung dieser Linsen ein optimaler Ausgleich der azimuthalen Beiträge auf.

- 25 Im Fall von planparallelen benachbarten (100)- oder (111)-Linsen gleicher Dicke oder von vier planparallelen benachbarten (110)-Linsen gleicher Dicke erhält man eine rotationssymmetrische Verteilung der optischen Wegunterschiede  $\Delta OPL$  durch Drehung der Linsen gemäß obigen Formeln. Auch bei Linsen mit gekrümmten Oberflächen läßt sich
- 30 durch geschickte Auswahl der Linsen einer Gruppe oder durch eine entsprechende Wahl

der Dicken und der Radien der Linsen bereits durch Drehen von zwei Linsen eine näherungsweise rotationssymmetrische Verteilung der optischen Wegunterschiede erzielen.

Bei (100)-Linsen oder (111)-Linsen ist es vorteilhaft, wenn eine Gruppe zwei Linsen aufweist. Bei (110)-Linsen stellt sich eine näherungsweise rotationssymmetrische

5 Verteilung der optischen Wegdifferenzen für vier Linsen in einer Gruppe ein.

Besonders effektiv wird die Verdrehung der Linsen dann, wenn die Linsen benachbart angeordnet sind. Besonders vorteilhaft ist es, eine Linse in zwei Teile aufzuteilen und die Linsenteile gegeneinander verdreht optisch nahtlos zu fügen, beispielsweise durch

10 Ansprengen.

Um für eine einzelne Gruppe von Linsen, deren Linsenachsen in die gleiche Hauptkristallrichtung oder eine dazu äquivalente Hauptkristallrichtung weisen, eine nahezu rotationssymmetrische Verteilung der optischen Wegunterschiede für zwei zueinander

15 orthogonale lineare Polarisationszustände zu erzielen, ist es günstig, wenn die Gruppe in eine Anzahl von n Untergruppen unterteilt wird. Eine Untergruppe weist dabei mindestens eine Linse auf, beispielsweise ein, zwei oder drei Linsen. Die Linsen einer Untergruppe sind dabei bis auf einen wegen der Azimutalsymmetrie unerheblichen Winkel-Offset nicht gegeneinander verdreht angeordnet. Für die Drehwinkel  $\gamma$  zwischen den Linsen einer

20 Untergruppe gilt somit  $\gamma = l \cdot \frac{360^\circ}{k} \pm 10^\circ$ , wobei l eine ganze Zahl ist und k die Zähligkeit

der Azimutalsymmetrie der Doppelbrechungsverteilung  $\Delta n(\alpha_L, \theta_L)$  einer Linse angibt.

Zwei Linsen aus zwei verschiedenen Untergruppen dagegen weisen jeweils einen Drehwinkel auf, der durch folgende Gleichung gegeben ist:

$$\gamma = \frac{360^\circ}{k \cdot n} + m \cdot \frac{360^\circ}{k} \pm 10^\circ, \text{ wobei } m \text{ eine ganze Zahl ist. Weisen die Untergruppen jeweils}$$

25 nur eine Linse auf, so ergeben sich die zuvor bereits beschriebenen Zusammenhänge für die Auswahl der Linsen, die eine Gruppe bilden. Führt beispielsweise das gegenseitige Verdrehen von zwei Linsen nicht zu der gewünschten Erzeugung einer nahezu rotationssymmetrischen Verteilung der optischen Wegunterschiede, so läßt sich durch die



Zuweisung von einer weiteren Linse zu einer Untergruppe die gewünschte Verteilung erzielen. Dies ist dann möglich, wenn die von den einzelnen Untergruppen hervorgerufenen Verteilungen der optischen Wegunterschiede nahezu ähnliche Maximalwerte und Verteilungen aufweisen. Durch gegenseitiges Drehen der Linsen einer Untergruppe zu den Linsen einer anderen Untergruppe ergibt sich letztendlich die nahezu rotationssymmetrischen Verteilung der optischen Wegunterschiede. Eine derart aus Untergruppen gebildete Gruppe weist jedoch immer  $n$  Linsen auf, für deren gegenseitige Drehwinkel  $\gamma$  gilt:  $\gamma = \frac{360^\circ}{k \cdot n} + m \cdot \frac{360^\circ}{k} \pm 10^\circ$ . Diese  $n$  Linsen müssen dann nicht unbedingt zu einer nahezu rotationssymmetrischen Verteilung der optischen Wegunterschiede führen.

10

Bei einem Projektionsobjektiv mit einer Vielzahl von Linsen ist es günstig, mehrere Gruppen von Linsen zu bilden. Dabei sind die Linsen einer Gruppe derart um die Linsenachsen verdreht angeordnet, daß die resultierende Verteilung  $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$  vom Azimutwinkel nahezu unabhängig ist.

15

Während nun die von den einzelnen Gruppen hervorgerufenen Verteilungen  $\Delta OPL_G(\alpha_R, \theta_R)$  durch das gegenseitige Verdrehen der Linsen einer Gruppe nahezu unabhängig vom Azimutwinkel sind, kann der Maximalwert der Gesamtverteilung  $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$  des gesamten Objektivs dadurch deutlich reduziert werden, daß das Projektionsobjektiv sowohl mindestens eine Gruppe mit (100)-Linsen als auch mindestens eine Gruppe mit (111)-Linsen aufweist. Eine gute Kompensation ist auch möglich, wenn innerhalb des Objektivs neben einer Gruppe mit (100)-Linsen eine Gruppe mit (110)-Linsen angeordnet ist.

20

Die Kompensation ist möglich, weil die Doppelbrechung nicht nur einen absoluten Wert, sondern auch eine Richtung aufweist. Die Kompensation des störenden Einflusses der Doppelbrechung ist dann optimal, wenn die Verteilung der optischen Wegunterschiede  $\Delta OPL_I(\alpha_R, \theta_R)$ , welche durch die Linsen oder Linsenteile von allen Gruppen mit (100)-Linsen hervorgerufen wird, und die Verteilung der optischen Wegunterschiede

25

$\Delta\text{OPL}_2(\alpha_R, \theta_R)$ , welche durch die Linsen oder Linsenteile von allen Gruppen mit (111)-Linsen oder (110)-Linsen hervorgerufen wird, ähnlich hohe Maximalwerte aufweist.

- Eine weitere vorteilhafte Möglichkeit, den störenden Einfluß der Doppelbrechung zu
- 5 reduzieren, besteht darin, ein optisches Element des Projektionsobjektivs mit einer Kompensations-Beschichtung zu belegen. Dabei geht man von der Erkenntnis aus, dass jede optische Beschichtung, beispielsweise Antireflex- oder Spiegelbeschichtungen, neben ihren Eigenschaften bezüglich Reflexion und Transmission auch immer optische
- 10 Wegunterschiede für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände mit sich bringen. Diese sind für s- und p-polarisiertes Licht unterschiedlich und hängen zudem vom Einfallswinkel des Strahls auf die Schicht ab. Man hat also eine einfallswinkelabhängige Doppelbrechung. Für ein Strahlbüschel, dessen Mittenstrahl mit Inzidenzwinkel  $0^\circ$  auf die Kompensations-Beschichtung trifft, sind die Doppelbrechungs-Werte und -Richtungen
- 15 rotationssymmetrisch bezüglich des Mittenstrahls. Der Inzidenzwinkel gibt dabei den Winkel zwischen dem Lichtstrahl und der Flächennormalen am Schnittpunkt des Lichtstrahles mit der Fläche an. Die Kompensations-Beschichtung ist nun so aufgebaut, daß sie bezüglich des Betrags der Doppelbrechung ein vorgegebenes Verhalten als Funktion des Öffnungswinkels der Strahlen eines Strahlbüschels zeigt.
- 20 Dabei bestimmt man zunächst die Verteilung der optischen Wegunterschiede  $\Delta\text{OPL}(\alpha_R, \theta_R)$  für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände für ein Strahlbüschel in der Bildebene des Projektionsobjektivs. Der Öffnungswinkel  $\theta_R$  eines Strahls wird dabei zwischen der Strahlrichtung und der optischen Achse in der Bildebene, der Azimutwinkel  $\alpha_R$  zwischen der in die Bildebene projizierten Strahlrichtung und einer festen
- 25 Bezugsrichtung innerhalb der Bildebene bestimmt. Die Verteilung der optischen Wegunterschiede  $\Delta\text{OPL}(\alpha_R, \theta_R)$  für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände beschreibt dabei alle Einflüsse durch intrinsische Doppelbrechung von Fluorid-Kristall-Linsen, Spannungsdoppelbrechung, Belegung der optischen Elemente mit Antireflex-Schichten von Linsen oder Spiegelschichten.

30

- Aus der Verteilung der optischen Wegunterschiede  $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$  wird die effektive Doppelbrechungsverteilung der Kompensations-Beschichtung bestimmt, welche auf ein optisches Element mit einer Elementachse aufgebracht wird. Als optische Elemente werden beispielsweise refraktive oder diffraktive Linsen, Planplatten oder Spiegel eingesetzt. Die optischen Flächen des optischen Elements sind durch die optisch genutzten Bereiche, also in der Regel Vorder- und Rückfläche gegeben. Die Elementachse ist beispielsweise durch eine Symmetrieachse einer rotationssymmetrischen Linse gegeben. Weist die Linse keine Symmetrieachse auf, so kann die Elementachse durch die Mitte eines einfallenden Strahlbündels oder durch eine Gerade gegeben sein, bezüglich der die Strahlwinkel aller Lichtstrahlen innerhalb der Linse minimal sind. Die effektiven Doppelbrechungswerte hängen von Azimutwinkeln  $\alpha_R$ , welche auf eine zur Elementachse senkrecht stehende Bezugsrichtung bezogen sind, und von Öffnungswinkeln  $\theta_F$ , welche auch die Elementachse bezogen sind, ab.
- Einem Wertepaar  $(\alpha_R, \theta_R)$  eines Strahls in der Bildebene entspricht dabei ein Wertepaar  $(\alpha_F, \theta_F)$  am optischen Element.

- Die effektive Doppelbrechungsverteilung der Kompensations-Beschichtung wird nun so bestimmt, dass die Verteilung der optischen Wegunterschiede für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände für das gesamte System inklusive Kompensations-Beschichtung wesentlich reduziert sind gegenüber der Verteilung ohne die Kompensations-Beschichtung. In einem Objektiv mit einem optischen Element mit einer Kompensations-Beschichtung ist der Maximalwert der Verteilung  $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$  um bis zu 20%, insbesondere um bis zu 25% reduziert im Vergleich zu einem Objektiv ohne eine Kompensations-Beschichtung.

- Die effektive Doppelbrechungsverteilung lässt sich durch die Materialwahl, die Dickenverläufe und die Aufdampfwinkel für die einzelnen Schichten der Kompensations-Beschichtung beeinflussen. Das Schichtdesign und die Prozessparameter ergeben sich dabei durch Anwendung von Schichtdesign-Computer-Programmen, welche aus der

effektiven Doppelbrechungsverteilung, der Vorgabe der Materialien und der Geometrie des optischen Elements die Dickenverläufe der einzelnen Schichten und die Prozessgrößen bestimmt.

- 5 Die Kompensations-Beschichtung kann dabei auch auf mehreren optischen Elementen angebracht werden. Dies erhöht die Freiheitsgrade bei der Bestimmung der Kompensations-Schichten, die neben der Kompensation auch eine hohe Transmission der Beschichtung gewährleisten sollen.
- 10 Typische Verteilungen der optischen Wegunterschiede  $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$  für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände weisen für den Öffnungswinkel  $\theta_R=0^\circ$  geringe Wegunterschiede auf. Deshalb ist es günstig, wenn die doppelbrechende Wirkung der Kompensations-Beschichtung für den Öffnungswinkel  $\theta_F=0^\circ$  nahezu verschwindet. Dies erreicht man, wenn bei der Herstellung der Kompensations-Beschichtung keine hohen
- 15 Aufdampfwinkel zum Einsatz kommen. Vorteilhaft weist deshalb die optische Fläche des optischen Elements, auf das die Kompensations-Beschichtung aufgebracht wird, eine möglichst geringe Krümmung auf.

- Durch das gegeneinander Verdrehen von Linsen mit (100)- oder (111)-Orientierung erhält
- 20 man wie oben beschrieben näherungsweise eine rotationssymmetrische Verteilung der optischen Wegunterschiede  $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$  in der Bildebene, welche nur vom Öffnungswinkel  $\theta_R$  abhängt. Die optischen Wegunterschiede können mit der Kompensations-Beschichtung eines optischen Elements noch weiter reduziert werden, deren effektive Doppelbrechungsverteilung primär nur vom Öffnungswinkel  $\theta_F$  abhängt.
- 25 Dies wird erreicht, indem die Schichtdicken der einzelnen Schichten der Kompensations-Beschichtung über das optische Element homogen sind und keine Dickenverläufe aufweisen.

- Vorteilhaft lässt sich die Erfindung einsetzen, indem das optische Element mit der
- 30 Kompensationsbeschichtung ein austauschbares Element ist.

Vorteilhaft wird dabei das der Bildebene am nächsten gelegene optische Element verwendet.

- 5 Das Verfahren sieht dabei vor, dass in einem ersten Schritt die Verteilung der optischen Wegunterschiede  $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$  für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände für ein Strahlbüschel in der Bildebene bestimmt wird. Dabei wird der Einfluß von allen optischen Elementen des Objektivs inklusive Beschichtungen berücksichtigt. Das optische Element, das in einem nachfolgenden Schritt mit der
- 10 Kompensationsbeschichtung belegt wird, ist dabei ebenfalls im Strahlengang des Strahlbüschels.
- In einem zweiten Schritt wird mit dem bereits beschriebenen Verfahren die effektive Doppelbrechungsverteilung einer Kompensations-Beschichtung und die daraus resultierenden Dickenverläufe der einzelnen Schichten und die Prozessparameter zur
- 15 Herstellung der einzelnen Schichten bestimmt.
- In einem dritten Schritt wird das optische Element aus dem Strahlengang entfernt und mit der Kompensations-Beschichtung belegt. Falls die optische Fläche des optischen Elements bereits belegt war, wird diese Schicht vor der erneuten Belegung entfernt.
- In einem vierten Schritt wird das optische Element mit der Kompensations-Beschichtung
- 20 wieder an dem ursprünglichen Ort innerhalb des Objektivs angebracht.
- Als Material für die Linsen wird in Projektionsobjektiven vorzugsweise Kalzium-Fluorid eingesetzt, da Kalzium-Fluorid bei gemeinsamem Einsatz mit Quarz bei einer Arbeitswellenlängen von 193nm sich zur Farbkorrektur besonders eignet, beziehungsweise
- 25 bei einer Arbeitswellenlänge von 157nm eine ausreichende Transmission bereitstellt. Aber auch für die Fluorid-Kristalle Strontium-Fluorid oder Barium-Fluorid gelten die hier getroffenen Aussagen, da es sich um Kristalle vom gleichen kubischen Kristall-Typ handelt.

Der störende Einfluss der intrinsische Doppelbrechung macht sich besonders dann bemerkbar, wenn die Lichtstrahlen innerhalb der Linsen große Öffnungswinkel aufweisen. Dies ist für Projektionsobjektive der Fall, die eine bildseitige numerische Apertur aufweisen, die größer als 0.7, insbesondere größer 0.8 ist.

5

Die intrinsische Doppelbrechung nimmt mit abnehmender Arbeitswellenlänge deutlich zu. So ist die intrinsische Doppelbrechung bei einer Wellenlänge von 193nm mehr als doppelt so groß, bei einer Wellenlänge von 157nm mehr als fünfmal so groß wie bei einer Wellenlänge von 248nm. Die Erfindung lässt sich deshalb besonders dann vorteilhaft einsetzen, wenn die Lichtstrahlen Wellenlängen kleiner 200nm, insbesondere kleiner 160nm aufweisen.

10

Bei dem Objektiv kann es sich dabei um ein rein refraktives Projektionsobjektiv handeln, das aus einer Vielzahl von rotationssymmetrisch um die optische Achse angeordneten Linsen besteht, oder um ein Projektionsobjektiv vom katadioptrischen Objektivtyp.

15

Derartige Projektionsobjektive lassen sich vorteilhaft in Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlagen einsetzen, die ausgehend von der Lichtquelle ein Beleuchtungssystem, ein Masken-Positioniersystem, eine Struktur tragende Maske, ein Projektionsobjektiv, ein Objekt-Positionierungssystem und ein Licht empfindliches Substrat umfassen.

20

Mit dieser Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage lassen sich mikrostrukturierte Halbleiter-Bauelemente herstellen.

25

Die Erfindung stellt auch ein geeignetes Verfahren zur Herstellung von Objektiven bereit. Gemäß dem Verfahren werden Linsen oder Linsenteile aus Fluorid-Kristall, deren Linsenachsen in eine Hauptkristallrichtung weisen, derart um die Linsenachsen verdreht angeordnet, daß die Verteilung  $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$  wesentlich reduzierte Werte aufweist im Vergleich zu einer Linsenanordnung, bei der die Linsenachsen der Fluorid-Kristall-Linsen

30

in die gleiche Hauptkristallrichtung weisen und bei der die Linsen gleich orientiert angeordnet sind.

Das Verfahren sieht weiterhin vor, Gruppen mit (100)-Linsen und Gruppen mit (111)-  
5 Linsen oder (110)-Linsen zu bilden und diese parallel einzusetzen. Das Verfahren wird dabei beispielsweise bei einem Projektionsobjektiv angewandt, das mindestens zwei Fluorid-Kristall-Linsen in  $\langle 100 \rangle$ -Orientierung und mindestens zwei Linsen in  $\langle 111 \rangle$ -Orientierung umfasst. Von diesen Linsen ist dabei weiterhin die Lage der Bezugsrichtungen bekannt. Das Verfahren nutzt dabei die erfinderische Erkenntnis aus,  
10 daß sich durch Drehen der Fluorid-Kristall-Linsen um die optische Achse die Maximalwerte der Verteilung  $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$  der optischen Wegunterschiede wesentlich reduzieren lassen. Durch geeignete Simulationsmethoden wird dabei ein von einem Objektpunkt ausgehendes Strahlenbüschel durch ein Projektionsobjektiv propagiert und auf Grund der bekannten optischen Eigenschaften der Fluorid-Kristall-Linsen die Verteilung  
15  $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$  in der Bildebene bestimmt. In einem Optimierungsschritt werden nun die Drehwinkel zwischen den Fluorid-Kristall-Linsen so lange geändert, bis die Doppelbrechung tolerierbare Werte aufweist. Der Optimierungsschritt kann dabei auch weitere Randbedingungen wie beispielsweise die Kompensation von nicht rotationssymmetrischen Linsenfehlern durch Linsendrehen berücksichtigen. Durch diesen  
20 Optimierungsschritt kann der Maximalwert der Verteilung  $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$  um bis zu 30%, insbesondere bis zu 50% reduziert werden im Vergleich zu einem Projektionsobjektiv, bei dem die Fluorid-Kristall-Linsen gleich orientiert angeordnet sind. Das Optimierungsverfahren kann auch einen Zwischenschritt aufweisen. In diesem Zwischenschritt werden aus den Fluorid-Kristall-Linsen Gruppen mit Linsen gebildet,  
25 wobei die Linsen einer Gruppe für einen äußersten Aperturstrahl bei gleich orientierter Anordnung der Linsen einen ähnlichen optischen Wegunterschied zwischen zwei zueinander orthogonalen linearen Polarisationszuständen erzeugen. In dem nachfolgenden Optimierungsschritt werden dann die Linsen nur innerhalb der Gruppen gedreht, um die optischen Wegunterschiede zu reduzieren. So lassen sich zunächst die (100)-Linsen derart  
30 drehen, daß die durch die (100)-Linsen hervorgerufenen optischen Wegunterschiede

reduziert werden. Dann werden die (111)-Linsen derart gedreht, daß die durch die (111)-Linsen hervorgerufenen optischen Wegunterschiede reduziert werden. Die Verteilung der Fluorid-Kristall-Linsen auf Linsen mit (100)-Orientierung und (111)-Orientierung muß bei der Optimierung so erfolgen, daß sich die resultierende (100)-Verteilung  $\Delta OPL_{100}(\alpha_R, \theta_R)$  und die resultierende (111)-Verteilung  $\Delta OPL_{111}(\alpha_R, \theta_R)$  weitgehend kompensieren.  
Entsprechendes gilt auch für den parallelen Einsatz von (100)-Linsen und (110)-Linsen.

Die Erfindung betrifft auch ein Herstellverfahren für eine Linse, bei dem in einem ersten Schritt mehrere Platten aus Fluorid-Kristall optisch nahtlos zu einem Blank gefügt werden, und in einem zweiten Schritt die Linse aus dem Blank durch bekannte Herstellmethoden herausgearbeitet wird. Die Platten werden dabei wie zuvor für Linsen oder Linsenteile beschrieben, zueinander um die Flächennormalen verdreht angeordnet.

Platten, deren Flächennormalen in die gleiche Hauptkristallrichtung oder in eine dazu äquivalente Hauptkristallrichtung weisen, haben vorteilhafterweise die gleiche axiale Dicke.

Werden (100)-Platten mit (111)-Platten optisch nahtlos gefügt, so sollte das Verhältnis der Summe der Dicken der (111)-Platten zu der Summe der Dicken der (100)-Platten =  $1.5 \pm 0.2$  betragen.

Werden (100)-Platten mit (110)-Platten optisch nahtlos gefügt, so sollte das Verhältnis der Summe der Dicken der (110)-Platten zu der Summe der Dicken der (100)-Platten =  $4.0 \pm 0.4$  betragen.

Die Erfindung stellt auch ein Verfahren zur Herstellung von Linsen oder Linsenteilen aus Kristall-Material mit kubischer Kristallstruktur zur Verfügung, welche vorteilhaft in den zuvor beschriebenen Objektiven zur Reduzierung des störenden Einflusses der Doppelbrechung eingesetzt werden können.



Die erfindungsgemäße Reduzierung des störenden Einflusses der Doppelbrechung basiert auf dem gegenseitigen Verdrehen von Linsen innerhalb einer Gruppe, wobei die Linsenachsen der Linsen in die gleiche Kristallrichtung, bevorzugt in die gleiche Hauptkristallrichtung weisen. Um den Drehwinkel zwischen den einzelnen Linsen einer Gruppe einstellen zu können, sollte von jeder Linse eine Bezugsrichtung bekannt sein. Im  
5 folgenden werden Verfahren beschrieben, wie eine geeignete Bezugsrichtung bestimmt und auf der Linse oder dem Linsenteil markiert wird.

Bis eine Linse oder ein Linsenteil seine Endform aufweist, sind eine Vielzahl von form- und oberflächenbearbeitenden Prozessschritten erforderlich. Da die Linsen oder Linsenteile aus Kristallmaterial bestehen, dient in der Regel als Ausgangsmaterial ein Einkristall-Block, aus dem beispielsweise durch Sägen und Schleifen zunächst ein optischer Rohling gefertigt wird. Als optischer Rohling wird die Vorstufe einer Linse oder eines Linsenteils bezeichnet. Aus dem optischen Rohling können eine oder mehrere Linsen oder Linsenteile  
10 gefertigt werden. Werden aus einem optischen Rohling mehrere Linsen oder Linsenteile gefertigt, so wird der optische Rohling durch Sägen in einzelne optische Rohlinge zerlegt, wobei die einzelnen optischen Rohlinge in einem weiteren Bearbeitungsschritt geschliffen und/oder poliert werden, um an den so vorbearbeiteten Flächen optische Messungen durchführen zu können. Die derart vorbereiteten optischen Rohlinge bilden dann einzelne  
15 Materialscheiben in Form von Zylindern.  
20

Es ist nun vorteilhaft, wenn der optische Rohling derart bearbeitet wird, dass er eine optische Rohfläche aufweist, deren Flächennormale in Richtung einer definiert innerhalb der Kristallstruktur orientierten ersten Kristallrichtung weist. Vorteilhaft ist dies eine  
25 Hauptkristallrichtung, beispielsweise die  $\langle 100 \rangle$ ,  $\langle 111 \rangle$  oder  $\langle 110 \rangle$ -Kristallrichtung. Dazu ist es zunächst erforderlich, an dem optischen Rohling die Richtung der ersten Kristallrichtung zu bestimmen. Diese Bestimmung kann dabei an dem optischen Rohling vorgenommen werden, bevor der optische Rohling in einzelne optische Rohlinge zerteilt wird. Es ist auch möglich, zuerst die Teilung vorzunehmen und dann an den einzelnen  
30 optischen Rohlingen jeweils die Bestimmung vorzunehmen. Der optische Rohling wird

nun durch Sägen und Schleifen derart bearbeitet, dass die erste Kristallrichtung nahezu senkrecht auf der optischen Roh-Fläche steht. Eine Abweichung von  $\pm 5^\circ$  ist dabei tolerierbar. Die optische Roh-Fläche stellt dabei die Vorder- oder Rückseite der Materialscheibe dar.

5

In einem nächsten Schritt wird eine Bezugsrichtung bestimmt, welche senkrecht auf der ersten Kristallrichtung steht. Die Bezugsrichtung stellt dabei eine Projektion einer zweiten Kristallrichtung in eine Ebene dar, deren Flächennormalen in Richtung der ersten Kristallrichtung weist. Der Winkel zwischen der ersten Kristallrichtung und der zweiten

10 Kristallrichtung weist dabei einen von  $0^\circ$  verschiedenen Wert auf. Die zweite Kristallrichtung kann dabei ebenfalls eine Hauptkristallrichtung oder eine definiert innerhalb der Kristallstruktur orientierte Kristallrichtung, beispielsweise die  $\langle 331 \rangle$ -Kristallrichtung sein.

15 Ist die Bezugsrichtung bestimmt, so wird diese am optischen Rohling, beispielsweise am Außenzylinder durch eine Gravur markiert. Möglich ist auch, dass der optische Rohling fest mit einer Haltefassung verbunden ist und die Markierung an der Haltefassung angebracht wird.

20 Bei der Bestimmung der ersten Kristallrichtung kann der optische Rohling mit einer Messstrahlung aus einer definierten Richtung beleuchtet werden. Die Messstrahlung wird an den der ersten Kristallrichtung zugeordneten Kristallebenen, beispielsweise die  $\{111\}$ -Kristallebenen reflektiert und erzeugt einen entsprechenden Bragg-Reflex. Da der Inzidenzwinkel der Messstrahlung und das Material des optischen Rohlings bekannt sind,

25 ist auch der theoretische Soll-Winkel des Bragg-Reflexes durch Anwendung des Bragg-Reflektions-Gesetzes bekannt. Nur wenn die Flächennormale der optischen Roh-Flächen mit der ersten Kristallrichtung übereinstimmt, wird die reflektierte Messstrahlung unter dem vorgegebenen Soll-Winkel detektiert. Gegebenenfalls wird der optische Rohling beispielsweise durch Schleifen derart bearbeitet, dass die Flächennormale der optischen

30 Roh-Fläche mit der ersten Kristallrichtung übereinstimmt.

In einer vorteilhaften Ausführungsform ist der optische Rohling um eine Achse drehbar gelagert, welche senkrecht auf der optischen Roh-Fläche des optischen Rohlings steht. Die Bragg-Reflexe werden nun für verschiedene Drehwinkel bestimmt, im einfachsten Fall bei  
5 0° und bei 90°.

Die Bezugsrichtung kann ebenfalls durch Auswertung eines Bragg-Reflexes bestimmt werden. Dabei wird die Messstrahlung an den der zweiten Kristallrichtung zugeordneten Kristallebenen reflektiert.

10

Alternativ kann die Lage der Bezugsrichtung mit Hilfe des Laue-Verfahrens bestimmt werden.

Es ist günstig, die Bezugsrichtung derart zu wählen, dass ein Lichtstrahl in der Linse auf  
15 Grund der Doppelbrechung beispielsweise einen maximalen optischen Wegunterschied für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände erfährt, wenn die Projektion dieses Lichtstrahls in eine Ebene, welche senkrecht auf der ersten Kristallrichtung steht, parallel zur Bezugsrichtung verläuft. Wendet man die zuvor beschriebenen Kompensationsmethoden, also das gegenseitige Verdrehen von Linsen an, so ist es auf  
20 Grund dieser Markierungsvorschrift einfach, die vorgeschriebenen Drehwinkel einzustellen. Es ist auch möglich, die Bezugsrichtung zu markieren, für die ein Lichtstrahl einen minimalen optischen Wegunterschied erfährt, wenn dessen Projektion in eine Ebene, welche senkrecht auf der ersten Kristallrichtung steht, parallel zur Bezugsrichtung verläuft.

25 Weist die erste Kristallrichtung in die  $\langle 100 \rangle$ - Kristallrichtung oder in die  $\langle 111 \rangle$ - Kristallrichtung oder in eine zu diesen Kristallrichtungen äquivalente Kristallrichtung, so ist es günstig, wenn die Projektion der zweiten Kristallrichtung in eine Ebene, welche senkrecht auf der ersten Kristallrichtung steht, parallel zur Projektion der  $\langle 110 \rangle$ - Kristallrichtung oder einer dazu äquivalenten Kristallrichtung in die gleiche Ebene ist.

Lichtstrahlen, die parallel zur  $\langle 110 \rangle$ -Kristallrichtung oder einer dazu äquivalenten Kristallrichtung verlaufen, erfahren nämlich einen maximalen optischen Wegunterschied.

- 5 Weist die erste Kristallachse in die  $\langle 111 \rangle$ - Kristallrichtung oder eine dazu äquivalente Kristallrichtung, so ist es vorteilhaft, wenn die zweite Kristallrichtung in die  $\langle 331 \rangle$ - Kristallrichtung oder eine dazu äquivalente Kristallrichtung weist.

- 10 Da die Messstrahlung zur Bestimmung der Bragg-Reflexe zu Materialschäden im Bereich der optischen Roh-Flächen führen kann, ist es günstig, diejenigen Materialbereiche des optischen Rohlings durch Schleifen oder Polieren abzutragen, die von der Messstrahlung durchtreten wurden.

Mit diesem Verfahren lässt sich vorteilhaft ein optischer Rohling als Ausgangsprodukt zur Herstellung einer Linse oder eines Linsenteils für ein Objektiv herstellen.

15

- Wird nun aus dem derart vorbereiteten optischen Rohling eine Linse oder ein Linsenteil hergestellt, so wird bei der Bearbeitung der optischen Flächen der Linse oder des Linsenteils die Linsenachse nahezu parallel zur Richtung der ersten Kristallachse ausgerichtet, beziehungsweise parallel zur Flächennormalen der optischen Roh-Fläche. Die Abweichung sollte weniger als  $\pm 5^\circ$  betragen. Durch Schleifen und Polieren der optischen Roh-Flächen des optischen Rohling entstehen die gekrümmten Linsenflächen der Linse. Handelt es sich um rotationssymmetrische Flächen, so ist die Linsenachse die Symmetrieachse.

- 25 Alternativ kann die Bezugsrichtung auch an der Linse oder dem Linsenteil bestimmt und markiert werden. Aus einem optischen Rohling aus Kristallmaterial mit kubischer Kristallstruktur wird die Linse beispielsweise durch Schleifen und Polieren der Linsenflächen hergestellt. Dabei werden die Oberflächen derart bearbeitet, dass die Linsenachse parallel zu einer ersten Kristallrichtung, vorzugsweise einer Hauptkristallrichtung ist. Bei Linsen mit rotationssymmetrischen Linsenflächen bildet die
- 30

Symmetrieachse die Linsenachse. An der Linse oder dem Linsenteil wird nun eine Bezugsrichtung bestimmt. Die Bezugsrichtung steht dabei senkrecht auf der ersten Kristallrichtung und ist eine Projektion einer zweiten Kristallrichtung in eine zur ersten Kristallrichtung senkrecht liegenden Ebene. Die erste und die zweite Kristallrichtung schließen dabei einen von  $0^\circ$  verschiedenen Winkel ein. Die Bezugsrichtung wird nun an der Linse oder dem Linsenteil markiert. Ist die Linse mit einer Haltefassung fest verbunden, so kann die Markierung auch an dieser Fassung angebracht werden.

Zur Bestimmung der Bezugsrichtung können die bereits für den optischen Rohling vorgestellten Verfahren angewendet werden. Bei der Messung des Bragg-Reflexes ist es vorteilhaft, wenn die Position der Linse einstellbar ist, damit die Messstrahlung an der gekrümmten Linsenoberfläche an einem definierten Ort auftrifft. Insbesondere, wenn Messungen bei verschiedenen Drehstellungen der Linse vorgenommen werden, ist es günstig, wenn die Messstrahlung im Bereich des Linsenscheitels auftrifft.

Um bei konkaven Linsenflächen nicht durch Selbstabschattung behindert zu werden, ist es vorteilhaft, die zweite Kristallrichtung so auszuwählen, dass die einfallende Messstrahlung und die reflektierte Strahlung, welche zur Bestimmung der ersten Kristallrichtung, beziehungsweise der Bezugsrichtung herangezogen wird, nicht durch die Linsengeometrie gestört werden.

Vorteilhaft werden Linsen oder Linsenteile, welche eine Markierung einer Bezugsrichtung aufweisen, in Objektiven eingesetzt, bei denen durch gegeneinander Verdrehen der Linsen oder Linsenteile der störende Einfluß der Doppelbrechung reduziert wird. Mit der Markierung wird das gezielte Verdrehen der einzelnen Linsen wesentlich vereinfacht.

Näher erläutert wird die Erfindung anhand der Zeichnungen.

- Figur 1 zeigt einen Schnitt durch einen Fluorid-Kristall-Block senkrecht zu den  $\{100\}$ -  
Kristallebenen zusammen mit einer Linse eines Projektionsobjektives in  
5 schematischer Darstellung;
- Figur 2A-C zeigen je eine planparallele (100)-, (111)- und (110)-Linse in einer  
schematischen dreidimensionalen Darstellung;
- Figur 3 zeigt ein Koordinatensystem zur Definition des Öffnungswinkels und des  
Azimutwinkels;
- 10 Figur 4A-F zeigen die Doppelbrechungsverteilung für (100)-Linsen in verschiedenen  
Darstellungen, sowie die Doppelbrechungsverteilung für zwei gegeneinander um  
45° verdrehte (100)-Linsen;
- Figur 5A-F zeigen die Doppelbrechungsverteilung für (111)-Linsen in verschiedenen  
Darstellungen, sowie die Doppelbrechungsverteilung für zwei gegeneinander um  
15 60° verdrehte (111)-Linsen;
- Figur 6A-G zeigen die Doppelbrechungsverteilung für (110)-Linsen in verschiedenen  
Darstellungen, sowie die Doppelbrechungsverteilung für zwei gegeneinander um  
90° verdrehte (110)-Linsen, beziehungsweise für vier gegeneinander um 45°  
verdrehte (110)-Linsen;
- 20 Figur 7 zeigt den Linsenschnitt eines refraktiven Projektionsobjektivs;  
Figur 8 zeigt den Linsenschnitt eines katadioptrischen Projektionsobjektivs; und  
Figur 9 zeigt eine Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage in schematischer  
Darstellung.
- 25 Figur 1 zeigt schematisch einen Schnitt durch einen Fluorid-Kristall-Block 3. Der Schnitt  
ist so gewählt, daß die  $\{100\}$ -Kristallebenen 5 als einzelne Linien zu sehen sind, so daß die  
 $\{100\}$ -Kristallebenen 5 sich senkrecht zur Papierebene befinden. Der Fluorid-Kristall-  
Block 3 dient als Blank oder Ausgangsmaterial für die (100)-Linse 1. In diesem Beispiel ist  
die (100)-Linse 1 eine Bikonvex-Linse mit der Linsenachse EA, die zugleich

Symmetrieachse der Linse ist. Die Linse 1 wird nun so aus dem Fluorid-Kristall-Block herausgearbeitet, daß die Linsenachse EA senkrecht auf den {100}-Kristallebenen steht.

In Figur 2A wird mit einer dreidimensionalen Darstellung veranschaulicht, wie die  
5 intrinsische Doppelbrechung mit den Kristallrichtungen zusammenhängt, wenn die Linsenachse EA in  $\langle 100 \rangle$ -Kristallrichtung weist. Dargestellt ist eine kreisrunde planparallele Platte 201 aus Kalzium-Fluorid. Die Linsenachse EA zeigt dabei in  $\langle 100 \rangle$ -Kristallrichtung. Neben der  $\langle 100 \rangle$ -Kristallrichtung sind auch die  $\langle 101 \rangle$ -,  $\langle 1\bar{1}0 \rangle$ -,  
10  $\langle 10\bar{1} \rangle$ - und  $\langle 110 \rangle$ -Kristallrichtungen als Pfeile dargestellt. Die intrinsische Doppelbrechung ist schematisch durch vier "Keulen" 203 dargestellt, deren Oberflächen den Betrag der intrinsischen Doppelbrechung für die jeweilige Strahlrichtung eines Lichtstrahls angeben. Die maximale intrinsische Doppelbrechung ergibt sich in den  $\langle 101 \rangle$ -,  
15  $\langle 1\bar{1}0 \rangle$ -,  $\langle 10\bar{1} \rangle$ - und  $\langle 110 \rangle$ - Kristallrichtungen, also für Lichtstrahlen mit einem Öffnungswinkel von  $45^\circ$  und einem Azimutwinkel von  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  und  $270^\circ$  innerhalb der Linse. Für Azimutwinkel von  $45^\circ$ ,  $135^\circ$ ,  $225^\circ$  und  $315^\circ$  ergeben sich minimale Werte der intrinsischen Doppelbrechung. Für einen Öffnungswinkel von  $0^\circ$  verschwindet die intrinsische Doppelbrechung.

In Figur 2B wird mit einer dreidimensionalen Darstellung veranschaulicht, wie die  
20 intrinsische Doppelbrechung mit den Kristallrichtungen zusammenhängt, wenn die Linsenachse EA in  $\langle 111 \rangle$ -Kristallrichtung weist. Dargestellt ist eine kreisrunde planparallele Platte 205 aus Kalzium-Fluorid. Die Linsenachse EA zeigt dabei in  $\langle 111 \rangle$ -Kristallrichtung. Neben der  $\langle 111 \rangle$ -Kristallrichtung sind auch die  $\langle 011 \rangle$ -,  $\langle 101 \rangle$ - und  
25  $\langle 110 \rangle$ -Kristallrichtungen als Pfeile dargestellt. Die intrinsische Doppelbrechung ist schematisch durch drei "Keulen" 207 dargestellt, deren Oberflächen den Betrag der intrinsischen Doppelbrechung für die jeweilige Strahlrichtung eines Lichtstrahls angeben. Die maximale intrinsische Doppelbrechung ergibt sich jeweils in den  $\langle 011 \rangle$ -,  $\langle 101 \rangle$ - und  
30  $\langle 110 \rangle$ - Kristallrichtungen, also für Lichtstrahlen mit einem Öffnungswinkel von  $35^\circ$  und einem Azimutwinkel von  $0^\circ$ ,  $120^\circ$  und  $240^\circ$  innerhalb der Linse. Für Azimutwinkel von

60°, 180° und 300° ergeben sich jeweils minimale Werte der intrinsischen Doppelbrechung. Für einen Öffnungswinkel von 0° verschwindet die intrinsische Doppelbrechung.

- In Figur 2C wird mit einer dreidimensionalen Darstellung veranschaulicht, wie die
- 5 intrinsische Doppelbrechung mit den Kristallrichtungen zusammenhängt, wenn die Linsenachse EA in  $\langle 110 \rangle$ -Kristallrichtung weist. Dargestellt ist eine kreisrunde planparallele Platte 209 aus Kalzium-Fluorid. Die Linsenachse EA zeigt dabei in  $\langle 110 \rangle$ -Kristallrichtung. Neben der  $\langle 110 \rangle$ -Kristallrichtung sind auch die  $\langle 01 \bar{1} \rangle$ -, die  $\langle 10 \bar{1} \rangle$ -, die  $\langle 101 \rangle$ - und die  $\langle 011 \rangle$ -Kristallrichtungen als Pfeile dargestellt. Die intrinsische
- 10 Doppelbrechung ist schematisch durch fünf "Keulen" 211 dargestellt, deren Oberflächen den Betrag der intrinsischen Doppelbrechung für die jeweilige Strahlrichtung eines Lichtstrahls angeben. Die maximale intrinsische Doppelbrechung ergibt sich zum einen in Richtung der Linsenachse EA, und zum anderen jeweils in der  $\langle 01 \bar{1} \rangle$ -,  $\langle 10 \bar{1} \rangle$ -,  $\langle 101 \rangle$ - und  $\langle 011 \rangle$ -Kristallrichtung, also für Lichtstrahlen mit einem Öffnungswinkel von 0°,
- 15 beziehungsweise mit einem Öffnungswinkel von 60° und den vier Azimutwinkeln, die sich durch Projektion der  $\langle 01 \bar{1} \rangle$ -,  $\langle 10 \bar{1} \rangle$ -,  $\langle 101 \rangle$ - und  $\langle 011 \rangle$ -Kristallrichtungen in die  $\{110\}$ -Kristallebene ergeben. Derartig hohe Öffnungswinkel treten in Kristallmaterial jedoch nicht auf, da die maximalen Öffnungswinkel durch die Brechzahl des Kristalls auf kleiner 45° beschränkt sind.
- 20
- Die Definition von Öffnungswinkel  $\theta$  und Azimutwinkel  $\alpha$  ist in Figur 3 dargestellt. Für die (100)-Linse von Figur 2 zeigt die z-Achse in  $\langle 100 \rangle$ -Kristallrichtung, die x-Achse in die Richtung, die sich durch Projektion der  $\langle 110 \rangle$ -Kristallrichtung in die  $\{100\}$ -Kristallebene ergibt. Die z-Achse ist dabei gleich der Linsenachse und die x-Achse gleich der
- 25 Bezugsrichtung.

Aus der zitierten Internetpublikation ist bekannt, daß Messungen bei Strahlausbreitung in der  $\langle 110 \rangle$ -Kristallrichtung einen Doppelbrechungswert von  $(6.5 \pm 0.4)$  nm/cm bei einer Wellenlänge von  $\lambda = 156.1$  nm für Kalzium-Fluorid ergeben haben. Mit diesem Messwert



- als Normierungsgröße kann die Doppelbrechungsverteilung  $\Delta n(\theta, \alpha)$  einer Kalzium-Fluorid-Linse in Abhängigkeit der Kristallorientierung theoretisch abgeleitet werden. Dazu werden die aus der Kristalloptik bekannten Formalismen zur Berechnung der Indexellipsoide in Abhängigkeit der Strahlrichtung herangezogen. Die theoretischen Grundlagen sind beispielsweise im „Lexikon der Optik“, Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg Berlin, 1999 unter dem Stichwort „Kristalloptik“ zu finden.

- Neuere Messungen der Anmelderin haben ergeben, daß bei Strahlausbreitung in der  $\langle 110 \rangle$ -Kristallrichtung die intrinsische Doppelbrechung 11 nm/cm in Kalzium-Fluorid-Kristall bei einer Wellenlänge von  $\lambda = 156.1$  nm beträgt. Die im folgenden für die Normierungsgröße  $\Delta n_{\max} = 6,5 \text{ nm/cm}$  getroffenen Aussagen können ohne Schwierigkeiten auf die Normierungsgröße  $\Delta n_{\max} = 11 \text{ nm/cm}$  umgerechnet werden.

- In Figur 4A ist der Betrag der intrinsischen Doppelbrechung in Abhängigkeit des Öffnungswinkels  $\theta$  für den Azimutwinkel  $\alpha = 0^\circ$  für eine (100)-Linse dargestellt. Der Wert für die intrinsische Doppelbrechung von 6.5 nm/cm bei dem Öffnungswinkels  $\theta = 45^\circ$  entspricht dem Messwert. Der Kurvenverlauf wurde gemäß den aus der Kristalloptik bekannten Formeln bestimmt.
- In Figur 4B ist der Betrag der intrinsischen Doppelbrechung in Abhängigkeit des Azimutwinkels  $\alpha$  für den Öffnungswinkels  $\theta = 45^\circ$  für eine (100)-Linse dargestellt. Die vierzählige Azimutalsymmetrie ist offensichtlich.

- In Figur 4C ist die Doppelbrechungsverteilung  $\Delta n(\theta, \alpha)$  für einzelne Strahlrichtungen im  $(\theta, \alpha)$ -Winkelraum für eine (100)-Linse dargestellt. Jede Linie repräsentiert Betrag und Richtung für eine durch den Öffnungswinkel  $\theta$  und den Azimutwinkel  $\alpha$  definierte Strahlrichtung. Die Länge der Linien ist proportional zum Betrag der Doppelbrechung, beziehungsweise der Differenz der Hauptachsenlängen der Schnittellipse, während die Richtung der Linien die Orientierung der längeren Hauptachse der Schnittellipse angibt.

- Die Schnittellipse erhält man, indem man das Indexellipsoid für den Strahl der Richtung  $(\theta, \alpha)$  mit einer Ebene schneidet, die senkrecht auf der Strahlrichtung steht und durch die Mitte des Indexellipsoids geht. Sowohl die Richtungen als auch die Längen der Linien zeigen die Vierzähligkeit der Verteilung. Die Länge der Linien und damit die
- 5 Doppelbrechung ist bei den Azimutwinkeln  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  und  $270^\circ$  maximal.

- Figur 4D zeigt nun die Doppelbrechungsverteilung  $\Delta n(\theta, \alpha)$ , die sich ergibt, wenn zwei benachbarte planparallele (100)-Linsen gleicher Dicke um  $45^\circ$  gedreht angeordnet werden. Die resultierende Doppelbrechungsverteilung  $\Delta n(\theta, \alpha)$  ist unabhängig vom Azimutwinkel
- 10  $\alpha$ . Die längeren Hauptachsen der Schnittellipsen verlaufen tangential. Die resultierenden optischen Wegunterschiede zweier zueinander orthogonaler Polarisationszustände erhält man, indem man die Doppelbrechungswerte mit den physikalischen Weglängen der Strahlen innerhalb der planparallelen (100)-Linsen multipliziert. Rotationssymmetrische Doppelbrechungsverteilungen erhält man, wenn man  $n$  planparallele (100)-Linsen gleicher
- 15 Dicke derart anordnet, daß für die Drehwinkel  $\beta$  zwischen je zwei Linsen gilt:

$$\beta = \frac{90^\circ}{n} + m \cdot 90^\circ \pm 5^\circ,$$

- wobei  $n$  die Anzahl der planparallelen (100)-Linsen angibt und  $m$  eine ganze Zahl ist. Im Vergleich zu einer gleichorientierten Anordnung der Linsen kann der maximale Wert der Doppelbrechung für den Öffnungswinkel  $\theta = 30^\circ$  um 30% reduziert werden. Eine nahezu
- 20 rotationssymmetrische Verteilung der optischen Wegunterschiede für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände ergibt sich auch für beliebige Linsen, wenn alle Strahlen eines Strahlbüschels in den Linsen jeweils ähnlich große Winkel aufweisen und ähnlich große Weglängen innerhalb der Linsen zurücklegen. Die Linsen sollten deshalb so zu Gruppen zusammengefaßt werden, daß die Strahlen die zuvor angegebene Bedingung so
- 25 gut wie möglich erfüllen.

In Figur 4E ist der Betrag der intrinsischen Doppelbrechung in Abhängigkeit des Öffnungswinkels  $\theta$  für den Azimutwinkel  $\alpha = 0^\circ$  für die zwei benachbarten planparallelen (100)-Linsen gleicher Dicke der Figur 4D dargestellt. Der maximale Wert für die

intrinsische Doppelbrechung bei dem Öffnungswinkels  $\theta = 41^\circ$  beträgt 4.2nm/cm und ist somit um 35% zu dem Maximalwert von 6.5nm/cm in Figur 4A reduziert.

5 In Figur 4F ist der Betrag der intrinsischen Doppelbrechung in Abhängigkeit des Azimutwinkels  $\alpha$  für den Öffnungswinkels  $\theta = 41^\circ$  für die zwei benachbarten planparallelen (100)-Linsen gleicher Dicke der Figur 4D dargestellt. Die intrinsische Doppelbrechung ist unabhängig vom Azimutwinkel  $\alpha$ .

10 In Figur 5A ist der Betrag der intrinsischen Doppelbrechung in Abhängigkeit des Öffnungswinkels  $\theta$  für den Azimutwinkel  $\alpha = 0^\circ$  für eine (111)-Linse dargestellt. Der Wert für die intrinsische Doppelbrechung von 6.5nm/cm bei dem Öffnungswinkels  $\theta = 35^\circ$  entspricht dem Messwert. Der Kurvenverlauf wurde gemäß den aus der Kristalloptik bekannten Formeln bestimmt.

15 In Figur 5B ist der Betrag der intrinsischen Doppelbrechung in Abhängigkeit des Azimutwinkels  $\alpha$  für den Öffnungswinkels  $\theta = 35^\circ$  für eine (111)-Linse dargestellt. Die dreizählige Azimutalsymmetrie ist offensichtlich.

Figur 5C zeigt die Doppelbrechungsverteilung  $\Delta n(\theta, \alpha)$  für einzelne Strahlrichtungen im  
20  $(\theta, \alpha)$ -Winkelraum für eine (111)-Linse in der bereits mit Fig. 4C eingeführten Darstellung. Sowohl die Richtungen als auch die Längen der Linien zeigen die Dreizähligkeit der Verteilung. Die Länge der Linien und damit die Doppelbrechung ist bei den Azimutwinkeln  $0^\circ$ ,  $120^\circ$  und  $240^\circ$  maximal. Im Gegensatz zu einer (100)-Linse dreht sich die Orientierung der Doppelbrechung um  $90^\circ$ , wenn ein Strahl anstatt mit einem  
25 Azimutwinkel von  $0^\circ$  mit einem Azimutwinkel von  $180^\circ$  durch eine Linse läuft. Somit kann beispielsweise durch zwei gleich orientierte (111)-Linsen die Doppelbrechung kompensiert werden, wenn die Strahlwinkel eines Strahlbüschels zwischen den beiden Linsen ihr Vorzeichen tauschen. Dies ist insbesondere immer dann der Fall, wenn sich zwischen diesen beiden gleich orientierten (111)-Linsen ein Maximum oder ein Minimum

- für den Durchmesser eines Strahlbüschels befindet, welches von einem Objektpunkt auf der optischen Achse losläuft. Refraktive Projektionsobjektive weisen mehrere Linsengruppen mit positiver und negativer Brechkraft auf. Insbesondere in Linsengruppen mit positiver Brechkraft befindet sich oftmals ein Maximum des Büscheldurchmessers, in
- 5 Linsengruppen mit negativer Brechkraft ein Minimum des Büscheldurchmessers. Ein typisches Mikrolithographie-Projektionsobjektiv weist beispielsweise eine erste Linsengruppe mit positiver Brechkraft, eine zweite Linsengruppe mit negativer Brechkraft, eine dritte Linsengruppe mit positiver Brechkraft, eine vierte Linsengruppe mit negativer Brechkraft und eine fünfte Linsengruppe mit positiver Brechkraft auf. Innerhalb der ersten
- 10 Linsengruppe befindet sich ein Maximum des Büscheldurchmessers, innerhalb der zweiten Linsengruppe ein Minimum des Büscheldurchmessers, innerhalb der dritten Linsengruppe ein Maximum des Büscheldurchmessers, innerhalb der vierten Linsengruppe ein Minimum des Büscheldurchmessers und innerhalb der fünften Linsengruppe ein Maximum des Büscheldurchmessers. Es ist deshalb vorteilhaft, in Lichtrichtung vor und nach einer
- 15 Position mit extremalem Büscheldurchmesser gleich orientierte (111)-Linsen anzuordnen, beziehungsweise (111)-Linsen, die einen gegenseitigen Drehwinkel von  $\gamma = l \cdot 120^\circ \pm 10^\circ$  aufweisen, wobei  $l$  eine ganze Zahl ist. Auf Grund der dreizähligen Symmetrie der Doppelbrechungsverteilung von (111)-Linsen hat eine Drehung um  $\gamma = l \cdot 120^\circ$  ohne Einfluß auf die doppelbrechende Wirkung einer (111)-Linse. Ein Strahl mit nahezu
- 20 gleichem Öffnungswinkel, dessen Azimutwinkel sich jedoch zwischen den gleich orientierten (111)-Linsen um  $180^\circ$  geändert hat, erfährt eine zumindest teilweise Kompensation des optischen Wegunterschieds für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände.
- 25 Figur 5D zeigt nun die Doppelbrechungsverteilung  $\Delta n(\theta, \alpha)$ , die sich ergibt, wenn zwei benachbarte planparallele (111)-Linsen gleicher Dicke um  $60^\circ$  gedreht angeordnet werden. Die resultierende Doppelbrechungsverteilung  $\Delta n(\theta, \alpha)$  ist unabhängig vom Azimutwinkel  $\alpha$ . Die längeren Hauptachsen der Schnittellipsen verlaufen jedoch im Gegensatz zu Figur 4C radial. Die resultierenden optischen Wegunterschiede zweier zueinander orthogonaler
- 30 Polarisationszustände erhält man, indem man die Doppelbrechungswerte mit den

physikalischen Weglängen der Strahlen innerhalb der (111)-Linsen multipliziert. Ebenfalls rotationssymmetrische Doppelbrechungsverteilungen erhält man, wenn man  $n$  planparallele (111)-Linsen gleicher Dicke derart anordnet, daß für die Drehwinkel zwischen je zwei

$$\text{Linsen gilt: } \gamma = \frac{120^\circ}{k} + l \cdot 120^\circ \pm 5^\circ$$

- 5 wobei  $k$  die Anzahl der planparallelen (111)-Linsen angibt und  $l$  eine ganze Zahl ist. Im Vergleich zu einer gleichorientierten Anordnung der Linsen kann der Wert der Doppelbrechung für den Öffnungswinkel  $\theta = 30^\circ$  um 68% reduziert werden. Eine nahezu rotationssymmetrische Verteilung der optischen Wegunterschiede für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände ergibt sich auch für beliebige Linsen, wenn alle
- 10 Strahlen eines Strahlbüschels in den Linsen jeweils ähnlich große Winkel aufweisen und ähnlich große Weglängen innerhalb der Linsen zurücklegen. Die Linsen sollten deshalb so zu Gruppen zusammengefaßt werden, daß die Strahlen die zuvor angegebene Bedingung so gut wie möglich erfüllen.
- 15 In Figur 5E ist der Betrag der intrinsischen Doppelbrechung in Abhängigkeit des Öffnungswinkels  $\theta$  für den Azimutwinkel  $\alpha = 0^\circ$  für die zwei benachbarten planparallelen (111)-Linsen gleicher Dicke der Figur 5D dargestellt. Der maximale Wert für die intrinsische Doppelbrechung bei dem Öffnungswinkels  $\theta = 41^\circ$  beträgt 2.8nm/cm und ist somit um 57% zu dem Maximalwert von 6.5nm/cm in Figur 5A reduziert.
- 20 In Figur 5F ist der Betrag der intrinsischen Doppelbrechung in Abhängigkeit des Azimutwinkels  $\alpha$  für den Öffnungswinkels  $\theta = 41^\circ$  für die zwei benachbarten planparallelen (111)-Linsen gleicher Dicke der Figur 5D dargestellt. Die intrinsische Doppelbrechung ist unabhängig vom Azimutwinkel  $\alpha$ .
- 25 Kombiniert man nun innerhalb eines Projektionsobjektives Gruppen mit (100)-Linsen und Gruppen mit (111)-Linsen, so kann die von diesen Linsen eingebrachten optischen Wegunterschiede für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände weitgehend kompensiert werden. Dazu ist es erforderlich, daß zunächst innerhalb dieser

- Gruppen durch Drehung der Linsen eine nahezu rotationssymmetrische Verteilung der optischen Wegunterschiede erzielt wird und sich dann durch Kombination einer Gruppe mit (100)-Linsen und einer Gruppe mit (111)-Linsen die beiden Verteilungen der optischen Wegunterschiede kompensieren. Dazu nutzt man aus, daß die Orientierungen der längeren Hauptachsen der Schnittellipsen für die Doppelbrechungsverteilung einer Gruppe mit gedrehten (100)-Linsen senkrecht auf den Orientierungen der längeren Hauptachsen der Schnittellipsen für die Doppelbrechungsverteilung einer Gruppe mit gedrehten (111)-Linsen steht, wie dies den Figuren 4D und 5D zu entnehmen ist. Entscheidend ist dabei, daß zum einen von den einzelnen Gruppen eine nahezu rotationssymmetrische Verteilung der optischen Wegunterschiede erzeugt wird und zum anderen die Summe der Beiträge der Gruppen mit (100)-Linsen dem Betrage nach nahezu gleich groß ist zur Summe der Beiträge der Gruppen mit (111)-Linsen.

- In Figur 6A ist der Betrag der intrinsischen Doppelbrechung in Abhängigkeit des Öffnungswinkels  $\theta$  für den Azimutwinkel  $\alpha = 0^\circ$  für eine (110)-Linse dargestellt. Der Wert für die intrinsische Doppelbrechung von 6.5nm/cm bei dem Öffnungswinkels  $\theta = 0^\circ$  entspricht dem Messwert. Der Kurvenverlauf wurde gemäß den aus der Kristalloptik bekannten Formeln bestimmt.
- In Figur 6B ist der Betrag der intrinsischen Doppelbrechung in Abhängigkeit des Azimutwinkels  $\alpha$  für den Öffnungswinkels  $\theta = 35^\circ$  für eine (110)-Linse dargestellt. Die zweizählige Azimutalsymmetrie ist offensichtlich.

- Figur 6C zeigt die Doppelbrechungsverteilung  $\Delta n(\theta, \alpha)$  für einzelne Strahlrichtungen im  $(\theta, \alpha)$ -Winkelraum für eine (110)-Linse in der bereits mit Fig. 4C eingeführten Darstellung. Sowohl die Richtungen als auch die Längen der Linien zeigen die Zweizähligkeit der Verteilung. Die Linie mit maximaler Länge und damit die maximale Doppelbrechung ergibt sich für den Öffnungswinkel  $\theta = 0^\circ$ .

Figur 6D zeigt nun die Doppelbrechungsverteilung  $\Delta n(\theta, \alpha)$ , die sich ergibt, wenn zwei benachbarte planparallele (110)-Linsen gleicher Dicke um  $90^\circ$  gedreht angeordnet werden. Die resulierende Doppelbrechungsverteilung  $\Delta n(\theta, \alpha)$  weist nun eine vierzählige Azimutalsymmetrie auf. Maximale Doppelbrechungswerte treten bei den Azimutwinkeln  $\alpha$   
 5 =  $45^\circ$ ,  $135^\circ$ ,  $225^\circ$  und  $315^\circ$  auf, wobei der Wert der Doppelbrechung für den Öffnungswinkel  $\theta = 40^\circ$   $2.6\text{nm/cm}$  beträgt.

Figur 6E zeigt nun die Doppelbrechungsverteilung  $\Delta n(\theta, \alpha)$ , die sich ergibt, wenn die zwei planparallelen (110)-Linsen gleicher Dicke der Figur 6C mit zwei weiteren planparallelen  
 10 (110)-Linsen gleicher Dicke kombiniert werden. Der Drehwinkel zwischen je zwei der (110)-Linsen beträgt  $45^\circ$ . Die resultierende Doppelbrechungsverteilung  $\Delta n(\theta, \alpha)$  ist unabhängig vom Azimutwinkel  $\alpha$ . Die längeren Hauptachsen der Schnittellipsen verlaufen jedoch im Gegensatz zu Figur 4C radial, also ähnlich der Verteilung von Figur 5C. Die resultierenden optischen Wegunterschiede zweier zueinander orthogonaler  
 15 Polarisationszustände erhält man, indem man die Doppelbrechungswerte mit den physikalischen Weglängen der Strahlen innerhalb der (110)-Linsen multipliziert. Ebenfalls rotationssymmetrische Doppelbrechungsverteilungen erhält man, wenn man  $4 \cdot n$  planparallele (110)-Linsen gleicher Dicke derart anordnet, daß für die Drehwinkel  $\beta$  zwischen je zwei Linsen gilt:  $\beta = \frac{45^\circ}{n} + m \cdot 90^\circ \pm 5^\circ$ ,  
 20 wobei  $4 \cdot n$  die Anzahl der planparallelen (100)-Linsen angibt und  $m$  eine ganze Zahl ist. Eine nahezu rotationssymmetrische Verteilung der optischen Wegunterschiede für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände ergibt sich auch für beliebige Linsen, wenn alle Strahlen eines Strahlbüschels in den Linsen jeweils ähnlich große Winkel aufweisen und ähnlich große Weglängen innerhalb der Linsen zurücklegen. Die Linsen  
 25 sollten deshalb so zu Gruppen zusammengefaßt werden, daß die Strahlen die zuvor angegebene Bedingung so gut wie möglich erfüllen.

In Figur 6F ist der Betrag der intrinsischen Doppelbrechung in Abhängigkeit des Öffnungswinkels  $\theta$  für den Azimutwinkel  $\alpha = 0^\circ$  für die vier benachbarten planparallelen (110)-Linsen gleicher Dicke der Figur 6E dargestellt. Der Wert für die intrinsische Doppelbrechung bei dem Öffnungswinkels  $\theta = 41^\circ$  beträgt 1.0nm/cm und ist somit um  
5 84% zu dem Maximalwert von 6.5nm/cm in Figur 5A reduziert.

In Figur 6G ist der Betrag der intrinsischen Doppelbrechung in Abhängigkeit des Azimutwinkels  $\alpha$  für den Öffnungswinkels  $\theta = 41^\circ$  für die vier benachbarten planparallelen (110)-Linsen gleicher Dicke der Figur 6E dargestellt. Die intrinsische Doppelbrechung ist  
10 unabhängig vom Azimutwinkel  $\alpha$ .

Kombiniert man nun innerhalb eines Projektionsobjektives Gruppen mit (110)-Linsen und Gruppen mit (100)-Linsen, so kann die von diesen Linsen eingebrachten optischen Wegunterschiede für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände  
15 weitgehend kompensiert werden. Dazu ist es erforderlich, daß zunächst innerhalb dieser Gruppen durch Drehung der Linsen eine nahezu rotationssymmetrische Verteilung der optischen Wegunterschiede erzielt wird und sich dann durch Kombination einer Gruppe mit (110)-Linsen und einer Gruppe mit (100)-Linsen die beiden Verteilungen der optischen Wegunterschiede kompensieren. Dazu nutzt man aus, daß die Orientierungen der längeren  
20 Hauptachsen der Schnittellipsen für die Doppelbrechungsverteilung einer Gruppe mit gedrehten (110)-Linsen senkrecht auf den Orientierungen der längeren Hauptachsen der Schnittellipsen für die Doppelbrechungsverteilung einer Gruppe mit gedrehten (100)-Linsen steht, wie dies den Figuren 4D und 6E zu entnehmen ist. Entscheidend ist dabei, daß zum einen von den einzelnen Gruppen eine nahezu rotationssymmetrische Verteilung  
25 der optischen Wegunterschiede erzeugt wird und zum anderen die Summe der Beiträge der Gruppen mit (110)-Linsen dem Betrage nach nahezu gleich groß ist zur Summe der Beiträge der Gruppen mit (100)-Linsen.

In Figur 7 ist der Linsenschnitt eines refraktiven Projektionsobjektivs 611 für die  
30 Wellenlänge 157nm dargestellt. Die optischen Daten für dieses Objektiv sind in Tabelle 1



- zusammengestellt. Das Ausführungsbeispiel ist der Patentanmeldung PCT/EP00/13148 (WO 150171 A1) der Anmelderin entnommen und entspricht dort Figur 7 beziehungsweise Tabelle 6. Zur näheren Beschreibung der Funktionsweise des Objektivs wird auf die Patentanmeldung PCT/EP00/13148 (WO 150171 A1) verwiesen. Alle Linsen dieses
- 5   Objektivs bestehen aus Kalzium-Fluorid-Kristall. Die bildseitige numerische Apertur des Objektivs beträgt 0.9. Die Abbildungsleistung dieses Objektivs ist so gut korrigiert, daß die Abweichung von der Wellenfront einer idealen Kugelwelle kleiner  $1.8\lambda$  bezogen auf die Wellenlänge von 157nm ist. Gerade bei diesen Hochleistungsobjektiven ist es erforderlich, daß störende Einflüsse wie die der intrinsischen Doppelbrechung so weit wie möglich
- 10   reduziert werden.

- Für das Ausführungsbeispiel der Figur 6 wurden die Öffnungswinkel  $\theta$  und Strahlwege  $RL_L$  des äußersten Aperturstrahls 609 für die einzelnen Linsen L601 bis L630 berechnet. Der äußerste Aperturstrahl 609 geht dabei von dem Objektpunkt mit den Koordinaten  $x =$
- 15   0mm und  $y = 0$ mm aus und weist in der Bildebene einen Winkel bezüglich der optischen Achse auf, welcher der bildseitigen numerischen Apertur entspricht. Der äußerste Aperturstrahl 609 wird deshalb herangezogen, da sich für ihn nahezu die maximalen Öffnungswinkel innerhalb der Linsen ergeben.

Linse	Öffnungswinkel $\theta$ [°]	Strahlweg $RL_L$ [mm]	Optischer Wegunterschied (111)-Linse $\alpha_L = 0^\circ$ [nm]	Optischer Wegunterschied (111)-Linse $\alpha_L = 60^\circ$ [nm]	Optischer Wegunterschied (100)-Linse $\alpha_L = 0^\circ$ [nm]	Optischer Wegunterschied (100)-Linse $\alpha_L = 45^\circ$ [nm]	Optischer Wegunterschied (110)-Linse $\alpha_L = 0^\circ$ [nm]	Optischer Wegunterschied (110)-Linse $\alpha_L = 45^\circ$ [nm]	Optischer Wegunterschied (110)-Linse $\alpha_L = 90^\circ$ [nm]	Optischer Wegunterschied (110)-Linse $\alpha_L = 135^\circ$ [nm]
L601	8.1	15.1	2.9	-2.2	-0.8	-0.4	-9.0	-9.0	-9.1	-9.0
L602	8.7	8.2	1.7	-1.2	-0.5	-0.2	-4.9	-4.8	-4.9	-4.8
L603	7.8	9.5	1.7	-1.3	-0.4	-0.2	-5.7	-5.7	-5.7	-5.7
L604	10.7	7.2	1.9	-1.3	-0.6	-0.3	-4.1	-4.1	-4.1	-4.1
L605	9.4	6.5	1.5	-1.0	-0.4	-0.2	-3.8	-3.8	-3.8	-3.8
L606	10.3	8.5	2.1	-1.4	-0.7	-0.3	-4.8	-4.8	-4.8	-4.8
L607	21.8	12.7	6.6	-2.7	-3.9	-1.8	-4.2	-4.2	-4.3	-4.2
L608	25.4	22.2	12.8	-4.4	-8.7	-3.9	-5.3	-5.7	-5.8	-5.7
L609	16.3	36.1	14.3	-7.6	-6.8	-3.3	-16.5	-16.5	-16.7	-16.5
L610	12.2	15.2	4.5	-2.9	-1.7	-0.8	-8.2	-8.2	-8.2	-8.2
L611	2.3	26.6	1.4	-1.3	-0.1	-0.1	-17.2	-17.2	-17.2	-17.2
L612	2.3	32.2	1.6	-1.5	-0.1	-0.1	-20.8	-20.8	-20.8	-20.8
L613	-18.3	30.4	-6.6	13.5	-7.0	-3.3	-12.5	-12.6	-12.7	-12.6
L614	-18.7	22.0	-4.8	10.0	-5.3	-2.5	-8.9	-8.9	-9.0	-8.9
L615	-14.0	10.2	-2.0	3.5	-1.5	-0.7	-5.1	-5.1	-5.2	-5.1
L616	-1.3	29.8	-0.8	0.9	0.0	0.0	-19.3	-19.3	-19.3	-19.3
L617	26.4	31.6	18.6	-6.1	-13.0	-5.7	-6.7	-7.6	-7.5	-7.6
L618	33.5	14.3	9.3	-2.0	-7.9	-3.1	-0.6	3.2	-1.4	3.2
L619	26.5	7.5	4.4	-1.4	-3.1	-1.4	-1.6	-1.8	-1.8	-1.8
L620	19.3	6.4	3.0	-1.4	-1.6	-0.8	-2.5	-2.5	-2.5	-2.5
L621	6.7	8.0	1.3	-1.0	-0.3	-0.1	-4.9	-4.9	-4.9	-4.9
L622	-10.3	7.7	-1.3	1.9	-0.6	-0.3	-4.4	-4.4	-4.4	-4.4
L623	-11.9	9.6	-1.8	2.8	-1.0	-0.5	-5.2	-5.2	-5.2	-5.2
L624	0.3	17.8	0.1	-0.1	0.0	0.0	-11.6	-11.6	-11.6	-11.6
L625	6.0	16.3	2.3	-1.8	-0.5	-0.2	-9.9	-9.9	-10.0	-9.9
L626	-24.0	9.0	-1.9	5.0	-3.2	-1.5	-2.5	-2.6	-2.6	-2.6
L627	-35.6	8.0	-0.9	5.2	-4.7	-1.7	0.1	2.1	-0.5	2.1
L628	-39.4	12.0	-1.0	7.6	-7.5	-2.5	1.0	4.0	-0.3	4.0
L629	-35.3	27.3	-3.3	17.7	-15.7	-5.9	0.5	6.9	-1.9	6.9
L630	-35.3	26.0	-3.1	16.9	-15.0	-5.6	0.4	6.5	-1.9	6.5
Summe			64,5	42,3	112,9	47,4	-198.2	-178.7	-208.0	-178.8

Tabelle 2

Neben den Öffnungswinkeln  $\theta$  und den Weglängen  $RL_L$  für den äußersten Aperturstrahl sind in Tabelle 2 die optischen Wegunterschiede für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände für verschiedene Linsenorientierungen zusammengestellt. Die

optischen Wegunterschiede sind für (111)-Linsen, (100)-Linsen und (110)-Linsen zusammengestellt, wobei der Azimutwinkel  $\alpha_L$  des äußersten Randstrahls innerhalb der Linsen für eine (111)-Linse  $0^\circ$  und  $60^\circ$ , für eine (100)-Linse  $0^\circ$  und  $45^\circ$  und für eine (110)-Linse  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  und  $135^\circ$  beträgt.

5

Tabelle 2 ist zu entnehmen, daß die Öffnungswinkel  $\theta$  für die Linsen L608, L617, L618, L619, L627, L628, L629 und L630 größer als  $25^\circ$ , für die Linsen L618, L627, L628, L629 und L630 sogar größer als  $30^\circ$  sind. Besonders betroffen von hohen Öffnungswinkeln sind die der Bildebene am nächsten gelegenen Linsen L627 bis L630.

10

Durch das Design des Projektionsobjektives wurde erreicht, daß der maximale Öffnungswinkel aller Lichtstrahlen kleiner  $45^\circ$  ist. Der maximale Öffnungswinkel für den äußersten Aperturstrahl beträgt  $39.4^\circ$  bei der Linse L628. Hilfreich war der Einsatz von zwei dicken Planlinsen L629 und L630 unmittelbar vor der Bildebene.

15

Der Durchmesser der Blende, welche sich zwischen den Linsen L621 und L622 befindet, beträgt 270mm. Der Durchmesser der Linse L618 beträgt 207mm und die Durchmesser der Linsen L627 bis L630 sind alle kleiner 190mm. Somit sind die Durchmesser dieser Linsen, welche hohe Öffnungswinkel aufweisen, kleiner als 80% des Blendendurchmessers.

20

Tabelle 2 ist zu entnehmen, daß es für einzelne Linsen mit großen Öffnungswinkeln günstig ist, diese in (100)-Richtung zu orientieren, da die Doppelbrechungswerte insgesamt niedriger sind. Dies liegt daran, daß bei (100)-Linsen der Einfluß der  $\langle 110 \rangle$ -Kristallrichtungen erst bei größeren Winkeln zu spüren ist wie bei (111)-Linsen.

25 Beispielsweise bei den Linsen L608, L609 und L617 sind die optischen Wegunterschiede um mehr als 30% niedriger.

Anhand der beiden planparallelen Linsen L629 und L630 läßt sich gut zeigen, wie durch gegenseitige Drehung der Linsen die Doppelbrechung deutlich reduziert werden kann.

30 Beide Linsen weisen gleiche Öffnungswinkel für den äußersten Aperturstrahl von  $35.3^\circ$

- und ähnliche Strahlwege von 27.3mm, beziehungsweise 26.0mm auf. Würden beide Linsen als (100)-Linsen gleich orientiert eingebaut werden, so würde sich ein optischer Wegunterschied von 30.7nm ergeben. Verdreht man die beiden (100)-Linsen jedoch gegenseitig um  $45^\circ$ , so reduziert sich der optische Wegunterschied auf 20.9nm, also um 32%. Würden beide Linsen als (111)-Linsen gleich orientiert eingebaut werden, so würde sich ein optischer Wegunterschied von 34.6nm ergeben. Verdreht man die beiden (111)-Linsen jedoch gegenseitig um  $60^\circ$ , so reduziert sich der optische Wegunterschied auf 13.6nm, also um 61%.
- 10 Eine nahezu vollständige Kompensation der optischen Wegdifferenzen für zwei aufeinander orthogonale lineare Polarisationszustände auf Grund der intrinsischen Doppelbrechung, die durch die Linsen L629 und L630 hervorgerufen wird, kann erreicht werden, wenn die Linse L629 in die Linsen L6291 und L6292 und die Linse L630 in die Linsen L6301 und L6302 aufgespalten werden, wobei die Linse L6291 eine (100)-Linse der Dicke 9.15mm, die Linse L6292 eine (111)-Linse der Dicke 13.11mm, die Linse L6301 eine (100)-Linse der Dicke 8.33mm und die Linse L6302 eine (111)-Linse der Dicke 12.9mm ist. Die Linse L6291 und L6301 werden gegeneinander um  $45^\circ$ , die Linsen L6292 und L6302 um  $60^\circ$  gedreht. Der resultierende maximale optische Wegunterschied beträgt in diesem Fall dann 0.2nm. Die Linsen L6291 und L6292, ebenso wie die Linsen L6301 und L6302 können optisch nahtlos, beispielsweise durch Ansprengen, gefügt werden.
- Dieses Prinzip ist auch anwendbar, wenn das Projektionsobjektiv nur eine Kristall-Linse enthält. Diese wird dann mindestens in zwei Linsen zerlegt, die zueinander gedreht angeordnet werden. Das Zusammenfügen ist durch Ansprengen möglich. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, zunächst einzelne Platten der gewünschten Kristallorientierung optisch nahtlos zu verbinden und in einem weiteren Verfahrensschritt die Linse aus den aneinandergesetzten Platten zu fertigen.
- Eine weitere Möglichkeit, den störenden Einfluß der intrinsischen Doppelbrechung durch die Linsen L629 und L630 zu reduzieren, besteht darin, die Linse L629 in die Linsen

L6293 und L6294 sowie die Linse L630 in die Linsen L6303 und L6304 aufgespalten werden, wobei die Linse L6293 dann eine (110)-Linse der Dicke 11.13mm, die Linse L6294 eine (110)-Linse der Dicke 11.13mm, die Linse L6303 eine (110)-Linse der Dicke 10.62mm und die Linse L6304 eine (110)-Linse der Dicke 10.62mm ist. Die Linsen L6293 und L6294, sowie die Linsen L6303 und L6304 werden jeweils gegeneinander um 90° gedreht, wobei der Drehwinkel zwischen der Linse L6293 und L6303 45° beträgt. Der resultierende maximale optische Wegunterschied beträgt in diesem Fall 4.2nm. Die Linsen L6293 und L6294, ebenso wie die Linsen L6303 und L6304 können als Linsenteile optisch nahtlos, beispielsweise durch Ansprengen, gefügt werden.

10

Nahezu vollständig gelingt eine Kompensation der optischen Wegdifferenzen für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände, welche durch die hoch belasteten Linsen L629 und L630 hervorgerufen wird, wenn die Linse L629 in die drei Linsenteile L6295, L6296 und L6297 und die Linse L630 in die Linsenteile L6305, L6306 und L6307 aufgespalten werden, wobei die Linse L6295 dann eine (100)-Linse der Dicke 4.45mm, die Linsen L6296 und L6297 (110)-Linsen der Dicke 8.90mm, die Linse L6305 eine (100)-Linse der Dicke 4.25mm und die Linsen L6306 und L6307 (110)-Linsen der Dicke 8.49mm sind. Die Linsen L6294 und L6304 werden gegeneinander um 45°, je zwei der Linsen L6295, L6297, L6306 und L6307 um 45° gedreht. In dieser Kombination verringert sich der resultierende maximale optische Wegunterschied auf unter 0,1 nm. Die Linsen L6295 bis L6297, ebenso wie die Linsen L6305 bis L6307 können als Linsenteile optisch nahtlos, beispielsweise durch Ansprengen, gefügt werden.

15

Eine weitere Möglichkeit, den störenden Einfluß der intrinsischen Doppelbrechung durch die Linsen L629 und L630 zu reduzieren, besteht darin, zwei (110)-Linsen mit einer (100)-Linse zu kombinieren. Die beiden (110)-Linsen sind dabei um 90° gegeneinander verdreht einzubauen, während der Drehwinkel zwischen der (100)-Linse und den (110)-Linsen  $45^\circ + m \cdot 90^\circ$  beträgt, wobei m eine ganze Zahl ist. Dazu werden die Linse L629 in die Linsen L6298 und L6299 sowie die Linse L630 in die Linsen L6308 und L6309 aufgespalten, wobei die Linse L6298 dann eine (110)-Linse der Dicke 17.40mm, die Linse

20

30

L6299 eine (110)-Linse der Dicke 4.87mm, die Linse L6308 eine (110)-Linse der Dicke 12.53mm und die Linse L6309 eine (100)-Linse der Dicke 8.70mm ist. Der resultierende maximale optische Wegunterschied liegt bei 3,1 nm. Die Linsen L6298 und L6299, ebenso wie die Linsen L6308 und L6309 können als Linsenteile optisch nahtlos, beispielsweise durch Ansprenge

In Figur 8 ist der Linsenschnitt eines katadioptrischen Projektionsobjektivs 711 für die Wellenlänge 157nm dargestellt. Die optischen Daten für dieses Objektiv sind in Tabelle 3 zusammengestellt. Das Ausführungsbeispiel ist der Patentanmeldung PCT/EP00/13148 (WO 150171 A1) der Anmelderin entnommen und entspricht dort Figur 9 beziehungsweise Tabelle 8. Zur näheren Beschreibung der Funktionsweise des Objektivs wird auf die Patentanmeldung PCT/EP00/13148 (WO 150171 A1) verwiesen. Alle Linsen dieses Objektivs bestehen aus Kalzium-Fluorid-Kristall. Die bildseitige numerische Apertur des Objektivs beträgt 0.8.

Für das Ausführungsbeispiel der Figur 8 wurden die Öffnungswinkel  $\theta$  und Strahlwege  $RL_L$  des oberen äußersten Aperturstrahls 713 und des unteren äußersten Aperturstrahls 715 für die einzelnen Linsen L801 bis L817 berechnet. Die äußersten Aperturstrahlen 713 und 715 gehen dabei von dem Objektpunkt mit den Koordinaten  $x = 0\text{mm}$  und  $y = -82.15\text{mm}$  aus und weisen in der Bildebene Winkel bezüglich der optischen Achse auf, welche der bildseitigen numerischen Apertur entsprechen. Der obere und der untere äußerste Aperturstrahl wurden berechnet, da es sich um ein achsfernes Objektfeld handelt und somit die Aperturstrahlen nicht symmetrisch zur optischen Achse verlaufen, wie dies für den äußersten Aperturstrahl des Ausführungsbeispiels der Figur 7 der Fall war.

In Tabelle 4 sind die Daten für den oberen äußersten Aperturstrahl und in Tabelle 5 für den unteren äußersten Aperturstrahl zusammengestellt. Neben den Öffnungswinkeln  $\theta$  und den Weglängen  $RL_L$  für den äußersten Aperturstrahl sind in Tabelle 4 und Tabelle 5 die optischen Wegunterschiede für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände für verschiedene Linsenorientierungen zusammengestellt; und zwar für (111)-Linsen,

(100)-Linsen und (110)-Linsen, wobei der Azimutwinkel  $\alpha_L$  des äußersten Randstrahl innerhalb der Linsen für eine (111)-Linse  $0^\circ$  und  $60^\circ$ , für eine (100)-Linse  $0^\circ$  und  $45^\circ$  und für eine (110)-Linse  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  und  $135^\circ$  beträgt.

Linse	Öffnungswinkel $\theta$ [°]	Strahlweg $RL_L$ [mm]	Optischer Wegunterschied (111)-Linse $\alpha_L = 0^\circ$ [nm]	Optischer Wegunterschied (111)-Linse $\alpha_L = 60^\circ$ [nm]	Optischer Wegunterschied (100)-Linse $\alpha_L = 0^\circ$ [nm]	Optischer Wegunterschied (100)-Linse $\alpha_L = 45^\circ$ [nm]	Optischer Wegunterschied (110)-Linse $\alpha_L = 0^\circ$ [nm]	Optischer Wegunterschied (110)-Linse $\alpha_L = 45^\circ$ [nm]	Optischer Wegunterschied (110)-Linse $\alpha_L = 90^\circ$ [nm]	Optischer Wegunterschied (110)-Linse $\alpha_L = 135^\circ$ [nm]
801	1.4	28.1	0.8	-0.8	0.0	0.0	-18.2	-18.2	-18.2	-18.2
802	-10.8	30.7	-5.3	8.0	-2.7	-1.3	-17.2	-17.2	-17.3	-17.2
803	-15.6	32.4	-6.8	12.4	-5.7	-2.7	-15.3	-15.3	-15.4	-15.3
803	-24.4	31.8	-6.5	17.8	-11.7	-5.2	-8.4	-8.8	-9.0	-8.8
802	-19.5	26.6	-5.8	12.4	-6.8	-3.2	-10.2	-10.3	-10.4	-10.3
804	6.4	20.1	3.0	-2.4	-0.6	-0.3	-12.4	-12.4	-12.4	-12.4
805	10.8	34.4	9.0	-6.0	-3.0	-1.5	-19.3	-19.3	-19.3	-19.3
806	0.2	10.0	0.1	-0.1	0.0	0.0	-6.5	-6.5	-6.5	-6.5
807	-11.1	22.0	-3.9	5.9	-2.1	-1.0	-12.2	-12.2	-12.3	-12.2
808	0.1	18.5	0.0	0.0	0.0	0.0	-12.0	-12.0	-12.0	-12.0
809	-0.8	9.0	-0.1	0.2	0.0	0.0	-5.8	-5.8	-5.8	-5.8
810	1.1	12.4	0.3	-0.3	0.0	0.0	-8.0	-8.0	-8.0	-8.0
811	-16.8	9.4	-2.0	3.8	-1.9	-0.9	-4.2	-4.2	-4.2	-4.2
812	-10.4	29.8	-5.0	7.5	-2.4	-1.2	-16.9	-16.9	-16.9	-16.9
813	-8.8	34.7	-5.2	7.3	-2.1	-1.0	-20.5	-20.5	-20.5	-20.5
814	-9.4	17.5	-2.8	4.0	-1.2	-0.6	-10.2	-10.2	-10.2	-10.2
815	-27.4	28.1	-5.3	16.9	-12.2	-5.3	-5.2	-6.4	-6.1	-6.4
816	-28.7	40.2	-7.1	24.8	-18.6	-7.9	-6.2	-8.5	-7.6	-8.5
817	-30.8	39.0	-6.3	24.7	-19.6	-8.1	-3.9	-8.0	-5.7	-8.0
Summe			-48.9	136.1	-90.9	-40.3	-212.9	-220.9	-218.0	-220.9

5

Tabelle 4

Linse	Öffnungswinkel $\theta$ [°]	Strahlweg $RL_L$ [mm]	Optischer Wegunterschied (111)-Linse $\alpha_L = 0^\circ$ [nm]	Optischer Wegunterschied (111)-Linse $\alpha_L = 60^\circ$ [nm]	Optischer Wegunterschied (100)-Linse $\alpha_L = 0^\circ$ [nm]	Optischer Wegunterschied (100)-Linse $\alpha_L = 45^\circ$ [nm]	Optischer Wegunterschied (110)-Linse $\alpha_L = 0^\circ$ [nm]	Optischer Wegunterschied (110)-Linse $\alpha_L = 45^\circ$ [nm]	Optischer Wegunterschied (110)-Linse $\alpha_L = 90^\circ$ [nm]	Optischer Wegunterschied (110)-Linse $\alpha_L = 135^\circ$ [nm]
801	-11.6	32.1	-5.8	9.0	-3.2	-1.6	-17.6	-17.6	-17.6	-17.6
802	19.5	28.3	13.3	-6.1	-7.3	-3.4	-10.9	-10.9	-11.1	-10.9
803	24.7	33.8	19.1	-6.9	-12.7	-5.7	-8.6	-9.2	-9.3	-9.2
803	17.7	34.3	14.7	-7.4	-7.5	-3.6	-14.6	-14.6	-14.8	-14.6
802	12.7	31.6	9.7	-6.0	-3.8	-1.8	-16.7	-16.7	-16.8	-16.7
804	-5.2	27.7	-2.7	3.3	-0.6	-0.3	-17.4	-17.4	-17.4	-17.4
805	-4.5	34.6	-3.0	3.5	-0.5	-0.3	-21.9	-21.9	-21.9	-21.9
806	-8.6	19.5	-2.9	4.0	-1.1	-0.6	-11.6	-11.6	-11.6	-11.6
807	-0.5	16.5	-0.2	0.2	0.0	0.0	-10.7	-10.7	-10.7	-10.7
808	-8.2	25.6	-3.7	5.0	-1.3	-0.7	-15.3	-15.3	-15.3	-15.3
809	-7.5	10.1	-1.3	1.8	-0.4	-0.2	-6.1	-6.1	-6.1	-6.1
810	-9.1	13.1	-2.0	2.9	-0.8	-0.4	-7.7	-7.7	-7.7	-7.7
811	9.0	9.9	2.1	-1.5	-0.6	-0.3	-5.8	-5.8	-5.8	-5.8
812	2.6	30.7	1.8	-1.6	-0.2	-0.1	-19.8	-19.8	-19.8	-19.8
813	0.9	34.0	0.6	-0.6	0.0	0.0	-22.1	-22.1	-22.1	-22.1
814	1.3	10.4	0.3	-0.3	0.0	0.0	-6.7	-6.7	-6.7	-6.7
815	23.5	16.3	8.9	-3.4	-5.7	-2.6	-4.7	-4.8	-4.9	-4.8
816	24.6	37.2	21.0	-7.6	-13.9	-6.2	-9.6	-10.2	-10.3	-10.2
817	29.4	29.6	18.5	-5.1	-14.1	-5.9	-4.0	-6.2	-5.2	-6.2
Summe			88.3	-16.8	-73.7	-33.5	-231.9	-235.4	-235.2	-235.4

Tabelle 5

- 5 Tabelle 4 und Tabelle 5 ist zu entnehmen, daß die Öffnungswinkel  $\theta$  für die Linsen L815 bis L817 größer als  $25^\circ$  sind. Auch in diesem Ausführungsbeispiel weisen die der Bildebene am nächsten gelegenen Linsen L815 bis L817 große Öffnungswinkel auf. Durch das Design der Linsen L815 bis L817 wurde erreicht, daß der maximale

Öffnungswinkel kleiner gleich  $\arcsin\left(\frac{NA}{n_{FK}}\right) = \arcsin\left(\frac{0.8}{1.5597}\right) = 30.9^\circ$  ist. Der maximale

- 10 Öffnungswinkel für den äußersten Aperturstrahl beträgt  $30.8^\circ$  für die Linse L817.



Der Durchmesser der Blende, welche sich zwischen den Linsen L811 und L812 befindet, beträgt 193mm. Die Durchmesser der Linsen L815 bis L817 sind alle kleiner als 162mm. Somit sind die Durchmesser dieser Linsen, welche hohe Öffnungswinkel aufweisen, kleiner als 85% des Blendendurchmessers.

5

Tabelle 4 und Tabelle 5 ist zu entnehmen, daß es für Linsen mit großen Öffnungswinkeln günstig ist, diese in (100)-Richtung zu orientieren, da die Doppelbrechungswerte insgesamt niedriger sind als bei (111)-Linsen. Beispielsweise bei den Linsen L815 bis L817 sind die optischen Wegunterschiede um mehr als 20% niedriger als bei (111)-Linsen.

10

Anhand des Ausführungsbeispiels der Figur 8 soll im folgenden gezeigt werden, wie durch den parallelen Einsatz von Gruppen mit gegeneinander verdrehten (100)-Linsen und Gruppen mit gegeneinander verdrehten (111)-Linsen die intrinsische Doppelbrechung weitgehend kompensiert werden kann.

15

Zunächst werden alle Kalzium-Fluorid in (111)-Orientierung ohne gegenseitiges Verdrehen der (111)-Linsen eingebaut. In diesem Fall ergibt sich ein maximaler optischer Wegunterschied für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände von 136nm. Durch Drehen der (111)-Linsen kann der maximale optische Wegunterschied auf ca. 38nm reduziert werden. Dazu werden die Linsen L801 und L804 zu einer Gruppe und die Linsen L802 und L803 zu einer weiteren Gruppe zusammengefaßt, wobei der Drehwinkel zwischen den Linsen jeweils 60° beträgt. Zu je einer Dreier-Gruppe werden die Linsen L808, L809 und L810, sowie die Linsen L815, L816 und L817 zusammengefaßt, wobei der Drehwinkel zwischen je zwei dieser Linsen 40° beträgt. Die Linsen L811, L812, L813 und L814 werden zu einer Vierer-Gruppe zusammengefaßt mit einem gegenseitigen Drehwinkel von 30°.

20

25

30

Werden alle Kalzium-Fluorid-Linsen in (100)-Orientierung ohne gegenseitiges Verdrehen der (100)-Linsen eingebaut, so ergibt sich ein maximaler optischer Wegunterschied für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände von 90.6nm. Durch Drehen der

(100)-Linsen kann der maximale optische Wegunterschied auf ca. 40nm reduziert werden. Dazu werden die Linsen L801 und L804 zu einer Gruppe und die Linsen L802 und L803 zu einer weiteren Gruppe zusammengefaßt, wobei der Drehwinkel zwischen den Linsen jeweils  $45^\circ$  beträgt. Zu je einer Dreier-Gruppe werden die Linsen L808, L809 und L810, sowie die Linsen L815, L816 und L817 zusammengefaßt, wobei der Drehwinkel zwischen je zwei dieser Linsen  $30^\circ$  beträgt. Die Linsen L811, L812, L813 und L814 werden zu einer Vierer-Gruppe zusammengefaßt mit einem gegenseitigen Drehwinkel von  $22.5^\circ$ .

Einen maximalen optischen Wegunterschied für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände von nur 7nm erhält man, wenn man nun Gruppen mit (100)-Linsen mit Gruppen mit (111)-Linsen kombiniert. Dazu werden die Linsen L801 und L804 zu einer Gruppe von (111)-Linsen zusammengefaßt, wobei der Drehwinkel zwischen den Linsen  $60^\circ$  beträgt. Die Linsen L802 und L803 werden zu einer Gruppe von (100)-Linsen zusammengefaßt, wobei der Drehwinkel zwischen den Linsen  $45^\circ$  beträgt. Zu einer Dreier-Gruppe von (100)-Linsen werden die Linsen L808, L809 und L810 zusammengefaßt, wobei der Drehwinkel zwischen je zwei dieser Linsen  $30^\circ$  beträgt. Zu einer Dreier-Gruppe von (111)-Linsen werden die Linsen L815, L816 und L817 zusammengefaßt, wobei der Drehwinkel zwischen je zwei dieser Linsen  $40^\circ$  beträgt. Die Linsen L811, L812, L813 und L814 werden zu einer Vierer-Gruppe von (100)-Linsen zusammengefaßt mit einem Drehwinkel von  $22.5^\circ$ . Die Linsenachsen der nicht zu einer Gruppe zusammengefaßten Linsen L805 und L807 sind in  $\langle 111 \rangle$ -Kristallrichtung orientiert, während die Linsenachse der Linse L806 in  $\langle 100 \rangle$ -Kristallrichtung orientiert ist. Die Gruppen können gegenseitig beliebig um die optische Achse verdreht angeordnet sein. Diese Drehfreiheitsgrade lassen sich zur Kompensation nicht rotationssymmetrischer Aberrationen ausnützen, die beispielsweise durch die Fassung der Linsen erzeugt werden.

Im folgenden wird ein weiteres Verfahren beschrieben, wie die Gruppen mit (100)-, (111)- oder (110)-Linsen bestimmt werden können. Dabei geht man von einem Objektiv mit bekanntem optischen Design aus. Mehrere Linsen dieses Objektivs sind aus doppelbrechendem Fluorid-Kristall, wobei die doppelbrechenden Eigenschaften der Linsen

bekannt sind. Beispielsweise lässt sich der Einfluß der intrinsischen Doppelbrechung in Abhängigkeit des Öffnungswinkels und Azimutwinkels eines Strahls theoretisch vorhersagen. Die doppelbrechenden Eigenschaften können aber auch durch Messungen an den Linsen bekannt sein. Da die doppelbrechenden Eigenschaften der Linsen bekannt sind,

5 ist der optische Wegunterschied für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände bekannt, den ein Strahl innerhalb des Objektivs erfährt. Dieser optische Wegunterschied dient im folgenden als Optimiergröße, deren absoluten Wert es zu minimieren gilt. Auf ähnliche Weise kann die Optimierung auch für ein ganzes Strahlbüschel von einzelnen Strahlen durchgeführt werden. Mögliche Freiheitsgrade für

10 diese Optimierung sind die Drehwinkel der einzelnen Linsen zueinander und die Orientierung der Linsenachsen in Bezug auf die Hauptkristallrichtungen. Gemäß der zuvor beschriebenen Grundsätze ist es günstig, wenn zum einen die Linsenachsen in die Hauptkristallrichtungen weisen und zum anderen die Drehwinkel der Linsen zueinander in Abhängigkeit der Richtung der jeweiligen Linsenachse nur diskrete Werte annehmen.

15

Für die Orientierung der Linsenachse stehen drei Freiheitsgrade zur Verfügung. So können die Linsenachsen in (100)-, (111)- oder (110)-Kristallrichtung weisen.

20 Linsen, deren Linsenachsen in die gleiche oder eine dazu äquivalente Hauptkristallrichtung weisen, werden in einzelne Gruppen zusammengeschlossen, wobei jede Gruppe mindestens zwei Linsen aufweist.

Die diskreten Drehwinkel der Linsen einer Gruppe hängen von der Orientierung der Linsenachsen ab.

25 Für eine Gruppe mit  $n$  (100)-Linsen ergibt sich folgende Vorgabe für die Drehwinkel:

$$\gamma = \frac{90^\circ}{n} + m \cdot 90^\circ \pm 10^\circ, \text{ wobei } m \text{ eine beliebige ganze Zahl ist.}$$

Umfasst die Gruppe zwei (100)-Linsen, so beträgt der Drehwinkel zwischen diesen beiden Linsen idealerweise  $45^\circ$ , beziehungsweise  $135^\circ$ ,  $225^\circ$ ...

Für eine Gruppe mit  $n$  (111)-Linsen ergibt sich folgende Vorgabe für die Drehwinkel:

$$\gamma = \frac{120^\circ}{n} + m \cdot 120^\circ \pm 10^\circ, \text{ wobei } m \text{ eine beliebige ganze Zahl ist.}$$

Für eine Gruppe mit n (110)-Linsen ergibt sich folgende Vorgabe für die Drehwinkel:

$$\gamma = \frac{180^\circ}{n} + m \cdot 180^\circ \pm 10^\circ, \text{ wobei } m \text{ eine beliebige ganze Zahl ist.}$$

- 5 Es stehen somit als Freiheitsgrade diskrete Drehwinkel der Linsen untereinander und diskrete Kristallorientierungen zur Verfügung.

Innerhalb dieses Parameterraums ist nun diejenige Kombination der Drehwinkel und Kristallorientierungen für die einzelnen Linsen zu finden, für welche die Optimierungsgröße einen minimalen Wert annimmt, beziehungsweise einen Schwellwert unterschreitet.

- 10 Es gibt für jedes Objektiv eine optimale Lösung, für welche die optischen Wegunterschiede für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände für ein ganzes Strahlbüschel minimale Werte annehmen.

- Es ist jedoch äußerst aufwendig, diese optimale Lösung zu bestimmen, insbesondere, wenn  
15 das Objektiv eine große Anzahl von Linsen aufweist, wie dies bei dem Objektiv der Figur 7 oder dem Objektiv der Figur 8 der Fall ist.

- Es sind nun Optimierverfahren bekannt, um zwar nicht unbedingt die optimale Lösung, aber doch eine für die praktische Verwendung des Objektivs hinreichend gute Lösung zu  
20 finden. Eine in der Literatur bekannte sehr ähnliche mathematische Aufgabenstellung stellt das „Problem des Handlungsreisenden dar“, in dem es gilt, für eine gegebene Landkarte ein möglichst kurze Route durch vorgegebene Städte zu finden.

Bei der Optimierung können folgende Verfahren zum Einsatz kommen, welche unter diesen Bezeichnungen aus der Literatur bekannt sind:

- 25 1. Monte-Carlo-Suche  
2. Simulierte Abkühlung („Simulated Annealing“)  
3. Schwellakzeptanz („Threshold accepting“)  
4. Simulierte Abkühlung mit zwischenzeitlichem Aufheizen  
5. Genetischer Algorithmus

Zur Kompensation des störenden Einflusses der intrinsischen Doppelbrechung stehen in einem ersten Ausführungsbeispiel vier Freiheitsgrade (FGH) für jede Linse zur Verfügung:

FGH 1: (111)-Linse mit Drehwinkel  $0^\circ$

5 FGH 2: (111)-Linse mit Drehwinkel  $60^\circ$

FGH 3: (100)-Linse mit Drehwinkel  $0^\circ$

FGH 4: (100)-Linse mit Drehwinkel  $45^\circ$

Die Drehwinkel beziehen sich dabei jeweils auf eine feste Bezugsrichtung in der Objektebene.

10

Für das Projektionsobjektiv 711 der Figur 8 wurden mit Hilfe der Monte-Carlo-Suche und der Vorgabe der vier Freiheitsgrade FGH1 bis FGH4 die optimalen Kristallorientierungen der Linsenachsen und die Drehwinkel  $\beta_L$  der Linsen bezüglich einer festen Bezugsrichtung in der Objektebene bestimmt. Tabelle 6 gibt für die Linsen L801 bis L817 die

15 Kristallrichtungen der Linsenachsen und die Drehwinkel  $\beta_L$  an. Für jede Linse ist auch der optische Wegunterschied für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände für den obersten und untersten äußersten Aperturstrahl angegeben. Der maximale resultierende optische Wegunterschied beträgt 5nm.

Linse	Orientierung der Linsenachse	Winkel $\beta_L$ [°]	Optischer Wegunterschied für den obersten äußersten Aperturstrahl [nm]	Optischer Wegunterschied für den untersten äußersten Aperturstrahl [nm]
L801	<100>	45	0.0	-3.1
L802	<111>	60	-13.0	29.7
L803	<100>	0	-15.1	-27.6
L803	<100>	0	-26.0	-19.2
L802	<111>	60	28.3	-14.2
L804	<111>	0	-7.6	9.8
L805	<100>	45	-3.1	-1.0
L806	<100>	0	0.0	-2.1
L807	<111>	60	-7.8	1.0
L808	<100>	45	0.0	-1.1
L809	<100>	0	0.0	-0.7
L810	<100>	0	-0.1	-1.5
L811	<100>	0	-3.9	-1.7
L812	<111>	0	15.4	-5.0
L813	<100>	0	-3.7	-0.2
L814	<100>	0	-2.1	-0.1
L815	<100>	45	-11.4	-6.6
L816	<111>	60	-16.8	49.6
L817	<111>	0	55.7	-12.2
Summe			-5.0	-2.7

Tabelle 6

- Weitere Freiheitsgrade für die Optimierung erhält man, wenn man die Linsen einzelnen Gruppen zuweist. Dabei weisen die Linsenachsen der Linsen einer Gruppe in die gleiche Hauptkristallrichtung. Innerhalb einer Gruppe sind die Linsen nun derart gegeneinander verdreht angeordnet, dass die Verteilung der optischen Wegunterschiede für zwei
- 5 zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände, welche durch eine Gruppe hervorgerufen wird, nahezu rotationssymmetrisch ist. Die Drehwinkel zwischen den einzelnen Gruppen können nun beliebig eingestellt werden, um mit diesen zusätzlichen Freiheitsgraden beispielsweise fertigungsbedingte Zusatzaberrationen zu korrigieren.
- 10 Im Ausführungsbeispiel der Tabelle 6 bilden die Linsen L801 und L814 eine erste Gruppe mit (100)-Linsen, wobei die beiden Linsen gegeneinander um den Drehwinkel  $45^\circ$  verdreht angeordnet sind.
- Die Linsen L802, L804, L807 und L812 bilden eine zweite Gruppe mit (111)-Linsen. Die Linsen L802 und L807 und die Linsen L804 und L812 bilden dabei jeweils eine
- 15 Untergruppe, innerhalb derer die Linsen nicht gegeneinander verdreht angeordnet sind oder höchstens einen Drehwinkel von  $\gamma = l \cdot 120^\circ \pm 10^\circ$  aufweisen, wobei  $l$  eine ganze Zahl ist. Die beiden Untergruppen sind gegeneinander um den Winkel  $60^\circ$  verdreht angeordnet, so dass der Drehwinkel zwischen zwei Linsen aus verschiedenen Untergruppen  $\gamma = 60^\circ + m \cdot 120^\circ \pm 10^\circ$  beträgt, wobei  $m$  eine ganze Zahl ist.
- 20 Die Linsen L803, L805 und L815 bilden eine dritte Gruppe mit (100)-Linsen. Die Linse L803 und die Linsen L805 und L815 bilden dabei jeweils eine Untergruppe, innerhalb derer die Linsen nicht gegeneinander verdreht angeordnet sind oder höchstens einen Drehwinkel von  $\gamma = l \cdot 90^\circ \pm 10^\circ$  aufweisen, wobei  $l$  eine ganze Zahl ist. Die beiden Untergruppen sind gegeneinander um den Winkel  $45^\circ$  verdreht angeordnet, so dass der
- 25 Drehwinkel zwischen zwei Linsen aus verschiedenen Untergruppen  $\gamma = 45^\circ + m \cdot 90^\circ \pm 10^\circ$  beträgt, wobei  $m$  eine ganze Zahl ist.
- Die Linsen L808, L809 und L811 bilden eine vierte Gruppe mit (100)-Linsen. Die Linse L808 und die Linsen L808 und L809 bilden dabei jeweils eine Untergruppe, innerhalb derer die Linsen nicht gegeneinander verdreht angeordnet sind oder höchstens einen
- 30 Drehwinkel von  $\gamma = l \cdot 90^\circ \pm 10^\circ$  aufweisen, wobei  $l$  eine ganze Zahl ist. Die beiden

Untergruppen sind gegeneinander um den Winkel  $45^\circ$  verdreht angeordnet, so dass der Drehwinkel zwischen zwei Linsen aus verschiedenen Untergruppen  $\gamma = 45^\circ + m \cdot 90^\circ \pm 10^\circ$  beträgt, wobei  $m$  eine ganze Zahl ist.

- Die Linsen L816 und L817 eine fünfte Gruppe mit (111)-Linsen, wobei die beiden Linsen  
5 gegeneinander um den Drehwinkel  $60^\circ$  verdreht angeordnet sind.

In einem zweiten Ausführungsbeispiel stehen acht Freiheitsgrade für jede Linse zur Verfügung:

- FGH 1: (111)-Linse mit Drehwinkel  $0^\circ$   
10 FGH 2: (111)-Linse mit Drehwinkel  $60^\circ$   
FGH 3: (100)-Linse mit Drehwinkel  $0^\circ$   
FGH 4: (100)-Linse mit Drehwinkel  $45^\circ$   
FGH 5: (110)-Linse mit Drehwinkel  $0^\circ$   
FGH 6: (110)-Linse mit Drehwinkel  $90^\circ$   
15 FGH 7: (110)-Linse mit Drehwinkel  $45^\circ$   
FGH 8: (110)-Linse mit Drehwinkel  $135^\circ$

- Mit der Zahl der Freiheitsgrade wird das Optimierungsergebnis besser, jedoch steigt auch der Optimier-Aufwand exponentiell an. Weitere Freiheitsgrade ergeben sich durch eine  
20 feinere Abstufung der Drehwinkel.

- Bei der Optimierung können auch Meßdaten zur Spannungsdoppelbrechung, die Oberflächendaten der Linsen oder Spiegel und/oder Materialinhomogenitäten der Linsen berücksichtigt werden. Auf diese Weise werden alle auftretenden Störgrößen erfaßt und es  
25 wird mit Hilfe der Freiheitsgrade derjenige Objektivzustand ermittelt, welcher insgesamt eine gute Abbildungsqualität liefert.

- Im folgenden wird das Optimierungsverfahren in einzelnen Schritten erläutert:  
In einem ersten Schritt wird für ein Objektiv, bei dem die doppelbrechenden Eigenschaften  
30 der Linsen bekannt sind, die Zielfunktion berechnet. Die Zielfunktion gibt ein Maß für den



- störenden Einfluß der Doppelbrechung an. Als Zielfunktion kann beispielsweise der optische Wegunterschied für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände eines äußersten Aperturstrahls dienen. Möglich ist auch, als Zielfunktion den Maximalwert oder den Mittelwert einer Verteilung von optischen Wegunterschieden eines Strahlbüschels zu definieren. Die Drehwinkel der Linsen, die Kristallorientierungen und die Zielfunktion für diesen Objektivzustand werden abgespeichert.
- 5 Für die Zielfunktion existiert eine Schwelle, bei deren Unterschreitung der störende Einflusses der Doppelbrechung tolerierbar ist.
- In einem zweiten Schritt wird geprüft, ob die Zielfunktion die Schwelle unterschreitet.
- 10 Wird die Schwelle unterschritten, bricht das Verfahren ab. Wird die Schwelle nicht unterschritten folgt der dritte Schritt.
- Im dritten Schritt werden nun gemäß den vorgegebenen Freiheitsgraden die Drehwinkel der Linsen untereinander und die Kristallorientierungen innerhalb des Objektivs verändert, wobei eines der zuvor beschriebenen Verfahren, beispielsweise das Monte-Carlo-
- 15 Verfahren zum Einsatz kommt.
- Nach dem dritten Schritt beginnt das Verfahren wieder beim ersten Schritt, wobei die Anzahl der durchlaufenen Schleifen bestimmt wird. Überschreitet die Anzahl der durchlaufenen Schleifen eine maximale Anzahl, so bricht das Verfahren ebenfalls ab.
- 20 Das Verfahren bricht also ab, wenn eine bestimmte Schwelle unterschritten wird, oder eine vorgegebene Schleifenanzahl überschritten wird. Wird die maximale Schleifenanzahl überschritten, so kann beispielsweise als Resultat eine Rangliste entstehen, in der die einzelnen Objektivzustände mit der zugehörigen Zielfunktion angegeben werden.
- 25 Anhand des refraktiven Objektivs 611 soll im folgenden gezeigt werden, wie durch Belegung eines optischen Elements mit einer Kompensations-Beschichtung 613 der störende Einfluß von Doppelbrechungseffekten deutlich reduziert werden kann. Es sollen hierzu nur die Doppelbrechungs-Beiträge der beiden Linsen L629 und L630 betrachtet werden, die aus Kalzium-Fluorid bestehen und damit intrinsische Doppelbrechung zeigen.
- 30 Die beiden Linsen haben in diesem Ausführungsbeispiel eine (111)-Orientierung und sind

um  $60^\circ$  gegeneinander verdreht. Damit erreicht man eine nahezu rotationssymmetrische Verteilung der optischen Wegunterschiede  $\Delta OPL$ . Für einen äußersten Aperturstrahl beträgt der maximale optische Wegunterschied  $\Delta OPL$  zwischen 13.6nm und 14.6 nm, je nach Azimutwinkel  $\alpha_R$ . Nun wird auf der der Bildebene O' zugewandten optischen Fläche

5 der Linse L630 die in Tabelle 7 beschriebene Kompensations-Beschichtung 613 aufgebracht. Die Kompensations-Beschichtung 613 besteht aus 15 einzelnen Schichten aus den Materialien Magnesium-Fluorid ( $MgF_2$ ) und Lanthan-Fluorid ( $LaF_3$ ). n und k in Tabelle 7 geben Real- und Imaginärteil des Brechungsindex an. Die Schichtdicken sind homogen und weisen keinen lateralen Dickenverlauf auf. Die Aufdampfwinkel während

10 der Beschichtung stehen senkrecht zur optischen Fläche der Linse L630. Mit der Kompensations-Beschichtung beträgt der resultierende optische Wegunterschied 1.1 nm für die beiden Linsen L629 und L630 und ist somit deutlich reduziert im Vergleich zu einem Objektiv ohne Kompensations-Beschichtung.

Schicht	Dicke [nm]	Material
	Substrat	CaF <sub>2</sub>
1	103.54	MgF <sub>2</sub>
2	41.54	LaF <sub>3</sub>
3	33.35	MgF <sub>2</sub>
4	30.8	LaF <sub>3</sub>
5	39.53	MgF <sub>2</sub>
6	35.34	LaF <sub>3</sub>
7	32.05	MgF <sub>2</sub>
8	27.25	LaF <sub>3</sub>
9	28.57	MgF <sub>2</sub>
10	26.48	LaF <sub>3</sub>
11	27.64	MgF <sub>2</sub>
12	26.17	LaF <sub>3</sub>
13	27.36	MgF <sub>2</sub>
14	26.11	LaF <sub>3</sub>
15	8.66	MgF <sub>2</sub>

Optische Konstanten	n	k
LaF <sub>3</sub>	1.760026	0.00118471
MgF <sub>2</sub>	1.506675	0.00305275

Tabelle 7

5

Eine analoge Vorgehensweise ist auch möglich, wenn statt der beiden letzten Linsen das gesamte Objektiv betrachtet wird. Anstatt die Doppelbrechung mit nur einem optischen Element mit einer Kompensations-Beschichtung zu kompensieren kann man auch mehrere optische Elemente mit Kompensations-Beschichtungen belegen.

Das Verfahren kann auch angewendet werden, um Doppelbrechung in einem Gesamtsystem zu kompensieren, wobei die Ursachen dieser Doppelbrechung Spannungsdoppelbrechung, intrinsische Doppelbrechung und Doppelbrechung durch die  
5 übrigen Schichten sein können.

Nach der Endjustage eines Systems wird die Verteilung der optischen Wegunterschiede  $\Delta OPL$  für ein oder mehrere Strahlenbüschel in der Bildebene bestimmt. Mittels eines Programms zur Optimierung von Schichten wird dann die notwendige  
10 Kompensationsschicht berechnet und zum Beispiel auf der der Bildebene am nächsten gelegenen Systemfläche aufgebracht. Es ist günstig, wenn das der Bildebene am nächsten gelegene optische Element austauschbar ist. So lassen sich auch Doppelbrechungs-Effekte, die erst mit dem Betrieb des Objektivs entstehen, korrigieren.

15 Um Doppelbrechung von Kristallen im UV zu kompensieren, kann man, wie oben beschrieben, Kristall-Elemente mit verschiedenen Orientierungen der Kristallachsen hintereinander anordnen. Wenn man in einem optischen System Linsen mit verschiedenen Kristallrichtungen hintereinander anordnet, hat man das Problem, daß vielfach Linsen mit verschiedenen Winkeln durchstrahlt werden, die Kompensation dann möglicherweise nur  
20 eingeschränkt möglich ist. Bei Optiken, die nur eine Kristalllinse enthalten, ist diese Art der Kompensation überhaupt nicht möglich.

Ein Lösungsmöglichkeit ist es, eine Linse konstruktiv in zwei aufzuspalten, die verdreht gegeneinander anzusprengen sind. Praktisch leidet dieses Verfahren an Spannungen, die die Pässe verformen und daran, daß die beiden Hälften lateral mit einer Genauigkeit von  
25 Mikrometern positioniert werden müssen.

Vorgeschlagen wird, Blanks aus aneinander angesprengten, hinsichtlich der Orientierung der Kristallachsen gegeneinander verdrehten Einzelplatten herzustellen, die dann zu einer Linse gefräst und poliert werden. Alles obengesagte über die Orientierung gilt auch hierfür. Außer dem klassischen Ansprengen (wringing) der Optik-Fertigung sind auch alle anderen  
30 Fügetechniken mit innigem Kontakt und geringstmöglichem Spannungseintrag möglich

und von der Erfindung umfaßt. Das Ansprengen kann insbesondere durch Schichten, z. B. aus Quarzglas, unterstützt werden. Wichtig ist, daß an der Fügestelle keine Brechung oder Reflexion auftritt, die störend wäre.

- 5 Die Auswahl der Orientierungen erfolgt nach den oben beschriebenen Regeln.

Als Ausführungsbeispiele werden Blanks angegeben, aus denen sich beispielsweise die Linse L816 für das Projektionsobjektiv der Figur 8 fertigen läßt. Die Linse L816 weist eine konvexe asphärische Vorderfläche mit dem Scheitelradius 342.13mm und eine konkave sphärische Rückfläche mit dem Scheitelradius 449.26mm auf. Die axiale Dicke beträgt 37.3mm. Das Linsenmaterial ist Kalzium-Fluorid. Der Linsendurchmesser beträgt 141mm. Das Blank, aus dem die Linse herausgearbeitet werden soll, benötigt mindestens eine Gesamtdicke von 45mm und einen Durchmesser von 150mm. Das Blank kann dabei aus zwei gegeneinander um 45° gedrehten (100)-Platten der Dicke 9.0mm und zwei  
10  
15 gegeneinander um 60° gedrehten (111)-Platten der Dicke 13.5mm bestehen, die optisch nahtlos gefügt sind. Die (100)-Platten und die (111)-Platten sollten dabei jeweils benachbart angeordnet sein.

In einer weiteren Ausführungsform werden sechs jeweils gegeneinander um 45° gedrehte  
20 (100)-Platten der Dicke 3.0mm und sechs jeweils gegeneinander um 60° gedrehte (111)-Platten der Dicke 4.5 optisch nahtlos gefügt, wobei jeweils nach zwei (100)-Platten zwei (111)-Platten folgen.

In einer weiteren Ausführungsform werden vier jeweils gegeneinander um 45° gedrehte  
25 (110)-Platten der Dicke 9.0mm und zwei gegeneinander um 45° gedrehte (100)-Platten der Dicke 4.5 optisch nahtlos gefügt, wobei die zwei (100)-Platten auf die vier (110)-Platten folgen.

In einer weiteren Ausführungsform werden acht jeweils gegeneinander um 45° gedrehte  
30 (110)-Platten der Dicke 4.5mm und vier gegeneinander um 45° gedrehte (100)-Platten der

Dicke 2.25 optisch nahtlos gefügt, wobei nach vier (110)-Platten jeweils zwei (100)-Platten folgen.

- Um die Drehwinkel zwischen den Linsen oder den Linsenteile gezielt einstellen zu können,
- 5 werden im folgenden Verfahren beschreiben, mit denen an den Linsen oder Linsenteilen oder deren Haltefassungen entsprechende Markierungen angebracht werden können. Als Ausführungsbeispiel wird die Herstellung von Kalzium-Fluorid-Linsen beschreiben, deren Linsenachsen in  $\langle 111 \rangle$ -Kristallrichtung weisen. Die Herstellverfahren lassen sich aber auch auf die Herstellung von Linsen aus anderen Kristallmaterialien mit kubischer
- 10 Kristallstruktur wie Barium-Fluorid oder Strontium-Fluorid übertragen. Des weiteren können die Linsenachsen auch in die  $\langle 100 \rangle$ - oder die  $\langle 110 \rangle$ -Kristallrichtung weisen. Das Verfahren ist zur Herstellung sowohl von planparallelen als auch von gekrümmten Linsen oder Linsenteilen geeignet.
- 15 In einem ersten Schritt wird die Orientierung der  $\langle 111 \rangle$ -Kristallrichtung eines optischen Rohlings, in diesem Fall einer Kalzium-Fluorid-Scheibe bestimmt. Dies kann beispielsweise mit hoher Genauigkeit durch kristallographische Methoden, wie beispielsweise durch Ermittlung von Spaltflächen oder Erzeugung von Ätzgrübchen geschehen. Eine Verbesserung dieser Richtungsbestimmung erreicht man mit
- 20 röntgendiffraktometrischen Methoden. Ein dafür geeignetes Gerät ist eine Goniometeranordnung unter Einsatz von monochromatischer Röntgenstrahlung. Mit Hilfe aus der Literatur bekannter Tabellenwerte wird das Auftreten eines Bragg-Reflexes für die  $\{111\}$ -Kristallebenen bestimmt. Die Tabellenwerte geben dabei in Abhängigkeit der Reflex-Indizierung die erforderlichen Inzidenzwinkel an. Bei der Messung dreht man die
- 25 Kalzium-Fluorid-Scheibe um eine Achse, welche senkrecht auf der Kalzium-Fluorid-Scheibe steht. Damit erhält man für verschiedene Drehwinkel die Abweichung der  $\langle 111 \rangle$ -Kristallrichtung von der Flächennormalen der Kalzium-Fluorid-Scheibe. Es ist günstig, bei mindestens zwei Drehstellungen die Abweichung zu bestimmen. In diesem Ausführungsbeispiel werden die Messungen bei  $0^\circ$  und  $90^\circ$  durchgeführt. Um die

Messgenauigkeit zu erhöhen können die Messungen zusätzlich noch bei 180° und 270° durchgeführt werden.

5 In einem zweiten Schritt wird die Kalzium-Fluorid-Scheibe derart bearbeitet, dass die Flächennormale der Kalzium-Fluorid-Scheibe parallel zur Richtung der  $\langle 111 \rangle$ -Kristallrichtung ist. Die gemessene Abweichung dient dabei als Grundlage für eine gezielte Korrektur, d.h. ein definiertes Bearbeiten der Kalzium-Fluorid-Scheibe durch Sägen oder Schleifen. Nach diesem Bearbeitungsschritt weist die Flächennormale der Kalzium-Fluorid-Scheibe in die  $\langle 111 \rangle$ -Kristallrichtung mit einer Abweichung kleiner 5°.

10 In einem dritten Schritt wird an der Kalzium-Fluorid-Scheibe eine Bezugsrichtung bestimmt. Weist die Flächennormale der Kalzium-Fluorid-Scheibe in die  $\langle 111 \rangle$ -Kristallrichtung, ist es günstig, eine der drei Kristallrichtungen  $\langle 110 \rangle$ ,  $\langle 011 \rangle$  und  $\langle 101 \rangle$ , beziehungsweise  $\langle 100 \rangle$ ,  $\langle 010 \rangle$  und  $\langle 001 \rangle$  zu kennen, die in dreiwelliger Symmetrie um  
15 die  $\langle 111 \rangle$ -Kristallrichtung gruppiert sind. Dies ist deshalb interessant, da ein Lichtstrahl einen maximalen optischen Wegunterschied für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände auf Grund intrinsischer Doppelbrechung erfährt, wenn er in einer Kalzium-Fluorid-Linse in  $\langle 110 \rangle$ -Kristallrichtung oder einer dazu äquivalenten Kristallrichtung verläuft. Verläuft der Lichtstrahl in  $\langle 100 \rangle$ -Kristallrichtung oder einer dazu  
20 äquivalenten Kristallrichtung, erfährt er keinen optischen Wegunterschied. Die drei Kristallrichtungen  $\langle 110 \rangle$ ,  $\langle 011 \rangle$  und  $\langle 101 \rangle$  schließen dabei jeweils einen Winkel von 35°, die drei Kristallrichtungen  $\langle 100 \rangle$ ,  $\langle 010 \rangle$  und  $\langle 001 \rangle$  einen Winkel von 55° mit der  $\langle 111 \rangle$ -Kristallrichtung ein. Aus physikalischen Gründen sind Röntgenreflexe von (110)- oder (100)-Kristallebenen nicht meßbar. Daher muß man Bragg-Reflexe von anderen  
25 Kristallebenen zu Hilfe nehmen, die in definierter Beziehung zu den (100)-beziehungsweise (110)-Kristallebenen stehen. Beispielsweise kann ein (331)-Bragg-Reflex verwendet werden. Die drei Kristallrichtungen  $\langle 331 \rangle$ ,  $\langle 133 \rangle$  und  $\langle 313 \rangle$  schließen dabei jeweils einen Winkel von 22° mit der  $\langle 111 \rangle$ -Kristallrichtung ein. Der (331)-Bragg-Reflex erscheint für monochromatische Kupfer  $K\alpha$ -Strahlung (8048 eV) bei Kalzium-Fluorid  
30 unter 38°. Damit ergibt sich ein Einfallswinkel von 16° und ein Detektorwinkel von 60°

- relativ zur Bezugsebene, die durch die Oberfläche der Kalzium-Fluorid-Scheibe definiert ist. Wenn die Scheibe um  $360^\circ$  um die Flächennormale gedreht wird, sind bei drei Drehwinkeln Bragg-Reflexe messbar. Diese zeigen an, daß einer der Richtungsvektoren der drei relevanten (331)-Kristallebenen in der Einfallsebene der Bragg-Messung liegt. Die
- 5 Projektionen dieser drei (331)-Kristallrichtungen auf die Scheibenoberfläche sind parallel zu den Projektionen der drei Kristallrichtungen  $\langle 110 \rangle$ ,  $\langle 011 \rangle$  und  $\langle 101 \rangle$ . Wenn man die Richtungen der Projektionen der Kristallrichtungen  $\langle 331 \rangle$ ,  $\langle 133 \rangle$  und  $\langle 313 \rangle$  bestimmt, bestimmt man also gleichzeitig auch die Richtungen der Projektionen der
- 10 Kristallrichtungen  $\langle 110 \rangle$ ,  $\langle 011 \rangle$  und  $\langle 101 \rangle$ . Bei einer möglichen Abweichung der Oberflächennormalen von der  $\langle 111 \rangle$ -Kristallrichtung müssen Quelle und Detektor entsprechend nachgeführt werden.

- Alternativ können die Kristallorientierungen auch durch ein Laue-Bild bestimmt werden. Im Gegensatz zu den zuvor beschriebenen Messungen der Bragg-Reflexe mit
- 15 monochromatischer Röntgenstrahlung, wird beim Laue-Verfahren mit „weißem“, also breitbandigem Röntgenlicht gearbeitet. Für weißes Röntgenlicht erhält man Bragg-Reflexe von verschiedenen Kristallebenenscharen, so daß ein für das Material charakteristisches Laue-Bild entsteht. Wenn die  $\langle 111 \rangle$ -Kristallrichtung parallel zur Einstrahlrichtung ist, wird ein Laue-Bild mit dreizähliger Symmetrie erzeugt. Wenn die  $\langle 111 \rangle$ -Kristallrichtung
- 20 um einige Grad von der Scheibennormalen abweicht, ist das Resultat ein leicht verzerrtes Bild. Die exakte Analyse des Laue-Bildes, beispielsweise mit einer geeigneten Software, kann dann dazu dienen, die Abweichung der  $\langle 111 \rangle$ -Kristallrichtung von der Scheibennormalen zu bestimmen. Die Auswertung des Bildes erlaubt ferner die Bestimmung der dreizähligen Kristallrichtungen  $\langle 110 \rangle$ ,  $\langle 011 \rangle$  und  $\langle 101 \rangle$ ,
- 25 beziehungsweise  $\langle 100 \rangle$ ,  $\langle 010 \rangle$  und  $\langle 001 \rangle$  und damit die Orientierung der Scheibe.

- In einem vierten Schritt wird an der Kalzium-Fluorid-Scheibe mindestens eine Markierung angebracht, welche die Richtung einer der projizierten Kristallrichtungen  $\langle 110 \rangle$ ,  $\langle 011 \rangle$  und  $\langle 101 \rangle$ , beziehungsweise  $\langle 100 \rangle$ ,  $\langle 010 \rangle$  und  $\langle 001 \rangle$  angibt. Die Markierung kann
- 30 beispielsweise mittels Gravur, Ätzung oder Beschriftung erfolgen. Zur Markierung bietet



sich der Zylinderrand der Kalzium-Fluorid-Scheibe an. Alternativ kann die Markierung auch an einer Fassung angebracht sein, mit der die Kalzium-Fluorid-Scheibe fest verbunden ist.

- 5 In einem fünften Schritt wird eine Linse aus der Kalzium-Fluorid-Scheibe so gefertigt, daß die Linsenachse parallel zur  $\langle 111 \rangle$ -Kristallrichtung ist. Dabei wird die zuvor angebrachte Markierung bei der Bearbeitung der Kalzium-Fluorid-Scheibe nicht zerstört. Das ist möglich, da viele Bearbeitungsschritte wie Schleifen oder Polieren nur die Ober- und Unterseite der Linse betreffen, jedoch nicht den Zylinderrand. Wenn aber auch der Rand
- 10 der Kalzium-Fluorid-Scheibe bearbeitet, beispielsweise gedreht wird, ist es notwendig, mit hinreichender Genauigkeit die Markierung auf die Halterung der Kalzium-Fluorid-Scheibe zu übertragen und die Markierung nach erfolgter Bearbeitung wieder auf dem Zylinderrand anzubringen.
- 15 In einem weiteren Ausführungsbeispiel wird eine Linse aus einer Kalzium-Fluorid-Scheibe hergestellt, deren Linsenachse bereits in  $\langle 111 \rangle$ -Kristallrichtung weist. Die Markierung wird dabei nach der Herstellung der Linse aufgebracht.

20 In einem ersten Schritt wird die Linse aus der Kalzium-Fluorid-Scheibe derart gefertigt, daß die Linsenachse in  $\langle 111 \rangle$ -Kristallrichtung weist.

In einem zweiten Schritt wird die Bezugsrichtung bestimmt. Dabei werden die gleichen Verfahren angewandt, wie dies zuvor für die Kalzium-Fluorid-Scheibe beschrieben wurde. Dabei muß jedoch beachtet werden, daß der Auftreffpunkt des Röntgenstrahls auf die

25 Linsenoberfläche in der Höhe exakt eingestellt wird. Die Auflagefläche der Linse ist deshalb in der Höhe justierbar. Damit läßt sich das gekrümmte Profil der Linse abfahren, wenn man verschiedene Punkte auf der gekrümmten Linsenoberfläche vermisst. Außerdem ist zu beachten, daß durch die Krümmung eine Abschattung von einfallendem oder ausgehenden Strahl stattfinden kann. Durch Auswahl eines geeigneten Bragg-Reflexes und

30 einer daraus folgenden Meß-Geometrie können Abschattungen vermieden werden.

Bei planparallelen Platten kann das beschriebene Verfahren auf Basis eines Goniometeraufbaus an jedem Punkt der Oberfläche angewandt werden.

- 5 Bei der Bearbeitung der optischen Rohlinge und der Linsen ist zu beachten, daß die Bestrahlung von Kalzium-Fluorid mit Röntgenstrahlung Farbzentren erzeugen kann. Die Eindringtiefe von Cu-K $\alpha$ -Strahlung liegt bei Kalzium-Fluorid bei ca. 30  $\mu\text{m}$ . Um die Existenz von Farbzentren zu vermeiden, ist es vorteilhaft, die Röntgenanalyse nur an Kalzium-Fluorid-Rohlingen oder Linsen durchzuführen, bei denen später ein
- 10 entsprechender Materialabtrag erfolgt. Bei der Bestrahlung mit Cu-K $\alpha$ -Strahlung bedeutet das ein Abtrag von ca. 30  $\mu\text{m}$ .

- Anhand von Figur 9 wird der prinzipielle Aufbau einer Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage beschrieben. Die Projektionsbelichtungsanlage 81 weist eine
- 15 Beleuchtungseinrichtung 83 und Projektionsobjektiv 85 auf. Das Projektionsobjektiv 85 umfaßt eine Linsenordnung 819 mit einer Aperturblende AP, wobei durch die Linsenordnung 89 eine optische Achse 87 definiert wird. Ausführungsbeispiele für die Linsenordnung 89 sind in Figur 7 und Figur 8 gegeben. Zwischen der Beleuchtungseinrichtung 83 und dem Projektionsobjektiv 85 ist eine Maske 89 angeordnet,
- 20 die mittels eines Maskenhalters 811 im Strahlengang gehalten wird. Solche in der Mikrolithographie verwendeten Masken 89 weisen eine Mikrometer-Nanometer Struktur auf, die mittels des Projektionsobjektives 85 beispielsweise um den Faktor 4 oder 5 verkleinert auf eine Bildebene 813 abgebildet wird. In der Bildebene 813 wird ein durch einen Substrathalter 817 positioniertes lichtempfindliches Substrat 815, beziehungsweise
- 25 ein Wafer, gehalten.

- Die noch auflösbaren minimalen Strukturen hängen von der Wellenlänge  $\lambda$  des für die Beleuchtung verwendeten Lichtes sowie von der bildseitigen numerischen Apertur des Projektionsobjektives 85 ab, wobei die maximal erreichbare Auflösung der
- 30 Projektionsbelichtungsanlage 81 mit abnehmender Wellenlänge  $\lambda$  der

- Beleuchtungseinrichtung 83 und mit zunehmender bildseitiger numerischer Apertur des Projektionsobjektives 85 steigt. Mit den in Figur 7 und Figur 8 gezeigten Ausführungsbeispielen lassen sich Auflösungen kleiner 150nm realisieren. Deshalb müssen auch Effekte wie die intrinsische Doppelbrechung minimiert werden. Durch die
- 5 Erfindung ist es gelungen, den störenden Einfluß der intrinsichen Doppelbrechung gerade bei Projektionsobjektiven mit großen bildseitigen numerischen Aperturen stark zu reduzieren.

## M1587a

## TABELLE 1

	LINSEN	RADIEN	DICKEN	GLÄSER	BRECHZAHL BEI 157.629nm	1/2 FREIER DURCHMESSER
5	0	0.000000000	27.171475840	N2	1.00031429	46.200
		0.000000000	0.602670797	N2	1.00031429	52.673
	L601	900.198243311AS	15.151284556	CaF2	1.55929035	53.454
		-235.121108435	9.531971079	N2	1.00031429	54.049
10	L602	-167.185917779	8.294716452	CaF2	1.55929035	54.178
		-132.673519510	14.020355779	N2	1.00031429	54.901
	L603	-333.194588652	9.893809820	CaF2	1.55929035	53.988
		-155.450516203	15.930502944	N2	1.00031429	54.132
	L604	-73.572316296	7.641977580	CaF2	1.55929035	53.748
		-68.248613899AS	2.881720302	N2	1.00031429	55.167
15	L605	-86.993585564AS	5.094651720	CaF2	1.55929035	52.580
		-238.150965327	5.379130780	N2	1.00031429	53.729
	L606	-165.613920870	5.094651720	CaF2	1.55929035	53.730
		153.417884485	34.150169591	N2	1.00031429	56.762
	L607	-92.061009990	5.094651720	CaF2	1.55929035	58.081
20		8491.086261873AS	19.673523795	N2	1.00031429	74.689
	L608	-407.131300451	30.380807138	CaF2	1.55929035	87.291
		-140.620317156	0.761662684	N2	1.00031429	91.858
	L609	-4831.804853654AS	50.269660218	CaF2	1.55929035	117.436
		-192.197373609	1.688916911	N2	1.00031429	121.408
25	L610	-367.718684892	21.227715500	CaF2	1.55929035	127.704
		-233.628547894	2.224071019	N2	1.00031429	129.305
	L611	709.585855080	28.736922725	CaF2	1.55929035	137.016
		1238.859445357	9.120684720	N2	1.00031429	137.428
	L612	1205.457051945	49.281218258	CaF2	1.55929035	138.288
30		-285.321880705	1.625271224	N2	1.00031429	138.379
	L613	137.549591710	56.718543740	CaF2	1.55929035	108.652
		-4380.301012978AS	0.623523902	N2	1.00031429	106.138
	L614	2663.880214408	6.792868960	CaF2	1.55929035	103.602
		149.184979730	15.779049257	N2	1.00031429	84.589
35	L615	281.093108064	6.792868960	CaF2	1.55929035	83.373
		184.030288413	32.341552355	N2	1.00031429	77.968
	L616	-222.157416308	5.094651720	CaF2	1.55929035	77.463
		101.254238115AS	56.792834221	N2	1.00031429	71.826
	L617	-106.980638018	5.094651720	CaF2	1.55929035	72.237
40		1612.305471130	20.581065398	N2	1.00031429	89.760
	L618	-415.596135628	26.398111993	CaF2	1.55929035	96.803
		-204.680044631	0.713343960	N2	1.00031429	103.409
	L619	-646.696622394	25.867340760	CaF2	1.55929035	116.636
		-231.917626896	0.766268682	N2	1.00031429	118.569
45	L620	-790.657607677	23.400482872	CaF2	1.55929035	128.806
		-294.872053725	0.721402031	N2	1.00031429	130.074
	L621	786.625567756	40.932308205	CaF2	1.55929035	141.705
		-431.247283013	12.736629300	N2	1.00031429	142.089
		0.000000000	-8.491086200	N2	1.00031429	134.586
50	L622	295.022653593AS	20.185109438	CaF2	1.55929035	139.341
		449.912291916	0.619840486	N2	1.00031429	137.916
	L623	358.934076212	48.662890509	CaF2	1.55929035	136.936
		-622.662988878	30.955714157	N2	1.00031429	135.288
55	L624	-224.404889753	12.736629300	CaF2	1.55929035	134.760
		-251.154571510AS	16.079850229	N2	1.00031429	134.853
	L625	-193.582989843AS	16.510083506	CaF2	1.55929035	134.101
		-198.077570749	0.880353872	N2	1.00031429	136.109
	L626	206.241795157	19.927993542	CaF2	1.55929035	101.240
		338.140581666	0.925956949	N2	1.00031429	97.594
60	L627	111.017549581	24.580089962	CaF2	1.55929035	85.023
		169.576109839	0.777849447	N2	1.00031429	81.164
	L628	117.982165264	31.161065630	CaF2	1.55929035	75.464
		921.219058213AS	6.934980174	N2	1.00031429	69.501
	L629	0.000000000	22.260797322	CaF2	1.55929035	63.637
65		0.000000000	4.245543100	N2	1.00031429	48.606
	L630	0.000000000	21.227715500	CaF2	1.55929035	41.032

0.000000000	8.491086200	N2	1.00031429	26.698
0.000000000	0.000000000		1.00000000	11.550

Wellenlänge und Brechzahl sind gegenüber Vakuum angegeben.

5

## ASPHAERISCHE KONSTANTEN

## 10 Asphäre der Linse L601

K	0.0000
C1	1.28594437e-007
C2	8.50731836e-013
C3	1.16375620e-016
15 C4	2.28674275e-019
C5	-1.23202729e-022
C6	3.32056239e-026
C7	-4.28323389e-030
C8	0.00000000e+000
20 C9	0.00000000e+000

## Asphäre der Linse L604

25 K	-1.3312
C1	-4.03355456e-007
C2	2.25776586e-011
C3	-2.19259878e-014
C4	4.32573397e-018
30 C5	-7.92477159e-022
C6	7.57618874e-026
C7	-7.14962797e-030
C8	0.00000000e+000
35 C9	0.00000000e+000

## Asphäre der Linse L605

K	-1.1417
40 C1	1.33637337e-007
C2	1.56787758e-011
C3	-1.64362484e-014
C4	3.59793786e-018
C5	-5.11312568e-022
45 C6	1.70636633e-026
C7	1.82384731e-030
C8	0.00000000e+000
C9	0.00000000e+000

50

## Asphäre der Linse L607

K 0.0000  
 5 C1 1.34745120e-007  
 C2 -2.19807543e-011  
 C3 1.20275881e-015  
 C4 4.39597377e-020  
 C5 -2.37132819e-023  
 10 C6 2.87510939e-027  
 C7 -1.42065162e-031  
 C8 0.00000000e+000  
 C9 0.00000000e+000  
 Asphäre der Linse L609

15 K 0.0000  
 C1 6.85760526e-009  
 C2 -4.84524868e-013  
 C3 -6.28751350e-018  
 20 C4 -3.72607209e-022  
 C5 3.25276841e-026  
 C6 -4.05509974e-033  
 C7 -3.98843079e-035  
 C8 0.00000000e+000  
 25 C9 0.00000000e+000

## Asphäre der Linse L613

K 0.0000  
 30 C1 2.24737416e-008  
 C2 -4.45043770e-013  
 C3 -4.10272049e-017  
 C4 4.31632628e-021  
 35 C5 -3.27538237e-025  
 C6 1.44053025e-029  
 C7 -2.76858490e-034  
 C8 0.00000000e+000  
 C9 0.00000000e+000

40

## Asphäre der Linse L616

K 0.0000  
 45 C1 -2.83553693e-008  
 C2 -1.12122261e-011  
 C3 -2.05192812e-016  
 C4 -1.55525080e-020  
 C5 -4.77093112e-024  
 C6 8.39331135e-028  
 50 C7 -8.97313681e-032  
 C8 0.00000000e+000  
 C9 0.00000000e+000

55

## Asphäre der Linse L622

K 0.0421  
 5 C1 7.07310826e-010  
 C2 -2.00157185e-014  
 C3 -9.33825109e-020  
 C4 1.27125854e-024  
 C5 1.94008709e-027  
 10 C6 -6.11989858e-032  
 C7 2.92367322e-036  
 C8 0.00000000e+000  
 C9 0.00000000e+000

## 15 Asphäre der Linse L624

K 0.0000  
 C1 3.02835805e-010  
 20 C2 -2.40484062e-014  
 C3 -3.22339189e-019  
 C4 1.64516979e-022  
 C5 -8.51268614e-027  
 C6 2.09276792e-031  
 C7 -4.74605669e-036  
 25 C8 0.00000000e+000  
 C9 0.00000000e+000

## 30 Asphäre der Linse L625

K 0.0000  
 C1 -3.99248993e-010  
 C2 5.79276562e-014  
 35 C3 3.53241478e-018  
 C4 -4.57872308e-023  
 C5 -6.29695208e-027  
 C6 1.57844931e-031  
 C7 -2.19266130e-036  
 C8 0.00000000e+000  
 40 C9 0.00000000e+000

## Asphäre der Linse L628

45 K 0.0000  
 C1 4.40737732e-008  
 C2 1.52385268e-012  
 C3 -5.44510329e-016  
 C4 6.32549789e-020  
 50 C5 -4.58358203e-024  
 C6 1.92230388e-028  
 C7 -3.11311258e-033  
 C8 0.00000000e+000  
 55 C9 0.00000000e+000

TABELLE 3

L61						
5	LINSEN	RADIEN	DICKEN	GLÄSER	BRECHZAHL BEI 157.13 nm	1/2 FREIER DURCHMESSER
	0	0.000000000	34.000000000		1.000000000	82.150
		0.000000000	0.100000000		1.000000000	87.654
10	L801	276.724757380	40.000000000	CaF2	1.55970990	90.112
		1413.944109416AS	95.000000000		1.000000000	89.442
	SP1	0.000000000	11.000000000		1.000000000	90.034
		0.000000000	433.237005445		1.000000000	90.104
	L802	-195.924336384	17.295305525	CaF2	1.55970990	92.746
		-467.658808527	40.841112468		1.000000000	98.732
15	L803	-241.385736441	15.977235467	CaF2	1.55970990	105.512
		-857.211727400AS	21.649331094		1.000000000	118.786
	SP2	0.000000000	0.000010000		1.000000000	139.325
		253.074839896	21.649331094		1.000000000	119.350
	L803'	857.211727400AS	15.977235467	CaF2	1.55970990	118.986
20		241.385736441	40.841112468		1.000000000	108.546
	L802'	467.658808527	17.295305525	CaF2	1.55970990	102.615
		195.924336384	419.981357165		1.000000000	95.689
	SP3	0.000000000	6.255658280		1.000000000	76.370
		0.000000000	42.609155219		1.000000000	76.064
25	Z1	0.000000000	67.449547115		1.000000000	73.981
	L804	432.544479547	37.784311058	CaF2	1.55970990	90.274
		-522.188532471	113.756133662		1.000000000	92.507
	L805	-263.167605725	33.768525968	CaF2	1.55970990	100.053
		-291.940616829AS	14.536591424		1.000000000	106.516
30	L806	589.642961222AS	20.449887046	CaF2	1.55970990	110.482
		-5539.698828792	443.944079795		1.000000000	110.523
	L807	221.780582003	9.000000000	CaF2	1.55970990	108.311
		153.071443064	22.790060084		1.000000000	104.062
35	L808	309.446967518	38.542735318	CaF2	1.55970990	104.062
		-2660.227900099	0.100022286		1.000000000	104.098
	L809	23655.354584194	12.899131182	CaF2	1.55970990	104.054
		-1473.189213176	9.318886362		1.000000000	103.931
	L810	-652.136459374	16.359499814	CaF2	1.55970990	103.644
		-446.489459129	0.100000000		1.000000000	103.877
40	L811	174.593507050	25.900313780	CaF2	1.55970990	99.267
		392.239615259AS	14.064505431		1.000000000	96.610
		0.000000000	2.045119392		1.000000000	96.552
	L812	7497.306838492	16.759051656	CaF2	1.55970990	96.383
		318.210831711	8.891640764		1.000000000	94.998
45	L813	428.724465129	41.295806263	CaF2	1.55970990	95.548
		3290.097860119AS	7.377912006		1.000000000	95.040
	L814	721.012739719	33.927118706	CaF2	1.55970990	95.443
		-272.650872353	6.871397517		1.000000000	95.207
	L815	131.257556743	38.826450065	CaF2	1.55970990	81.345
50		632.112566477AS	4.409527396		1.000000000	74.847
	L816	342.127616157AS	37.346293509	CaF2	1.55970990	70.394
		449.261078744	4.859754445		1.000000000	54.895
	L817	144.034814702	34.792179308	CaF2	1.55970990	48.040
55		-751.263321098AS	11.999872684		1.000000000	33.475
	0'	0.000000000	0.000127776		1.000000000	16.430

60

65



## ASPHAERISCHE KONSTANTEN

## 5   Asphäre der Linse L801

	K	0.0000
	C1	4.90231706e-009
	C2	3.08634889e-014
10	C3	-9.53005325e-019
	C4	-6.06316417e-024
	C5	6.11462814e-028
	C6	-8.64346302e-032
	C7	0.00000000e+000
15	C8	0.00000000e+000
	C9	0.00000000e+000

## 20   Asphäre der Linse L803

	K	0.0000
	C1	-5.33460884e-009
	C2	9.73867225e-014
	C3	-3.28422058e-018
25	C4	1.50550421e-022
	C5	0.00000000e+000
	C6	0.00000000e+000
	C7	0.00000000e+000
	C8	0.00000000e+000
30	C9	0.00000000e+000

## Asphäre der Linse L803

35	K	0.0000
	C1	5.33460884e-009
	C2	-9.73867225e-014
	C3	3.28422058e-018
	C4	-1.50550421e-022
40	C5	0.00000000e+000
	C6	0.00000000e+000
	C7	0.00000000e+000
	C8	0.00000000e+000
45	C9	0.00000000e+000

## Asphäre der Linse L805

	K	0.0000
50	C1	2.42569449e-009
	C2	3.96137865e-014
	C3	-2.47855149e-018
	C4	7.95092779e-023
	C5	0.00000000e+000
55	C6	0.00000000e+000
	C7	0.00000000e+000
	C8	0.00000000e+000
	C9	0.00000000e+000

60

## Asphäre der Linse L806

5 K 0.0000  
 C1 -6.74111232e-009  
 C2 -2.57289693e-014  
 C3 -2.81309020e-018  
 C4 6.70057831e-023  
 10 C5 5.06272344e-028  
 C6 -4.81282974e-032  
 C7 0.00000000e+000  
 C8 0.00000000e+000  
 15 C9 0.00000000e+000

## Asphäre der Linse L811

K 0.0000  
 20 C1 2.28889624e-008  
 C2 -1.88390559e-014  
 C3 2.86010656e-017  
 C4 -3.18575336e-021  
 C5 1.45886017e-025  
 25 C6 -1.08492931e-029  
 C7 0.00000000e+000  
 C8 0.00000000e+000  
 C9 0.00000000e+000

30

## Asphäre der Linse L813

K 0.0000  
 C1 3.40212872e-008  
 35 C2 -1.08008877e-012  
 C3 4.33814531e-017  
 C4 -7.40125614e-021  
 C5 5.66856812e-025  
 C6 0.00000000e+000  
 40 C7 0.00000000e+000  
 C8 0.00000000e+000  
 C9 0.00000000e+000

## 45 Asphäre der Linse L815

K 0.0000  
 C1 -3.15395039e-008  
 C2 4.30010133e-012  
 50 C3 3.11663337e-016  
 C4 -3.64089769e-020  
 C5 1.06073268e-024  
 C6 0.00000000e+000  
 C7 0.00000000e+000  
 55 C8 0.00000000e+000  
 C9 0.00000000e+000

60

## 5      Asphäre der Linse L816

	K	0.0000
	C1	-2.16574623e-008
	C2	-6.67182801e-013
	C3	4.46519932e-016
10	C4	-3.71571535e-020
	C5	0.00000000e+000
	C6	0.00000000e+000
	C7	0.00000000e+000
	C8	0.00000000e+000
15	C9	0.00000000e+000

## Asphäre der Linse L817

20	K	0.0000
	C1	2.15121397e-008
	C2	-1.65301726e-011
	C3	-5.03883747e-015
	C4	1.03441815e-017
25	C5	-6.29122773e-021
	C6	1.44097714e-024
	C7	0.00000000e+000
	C8	0.00000000e+000
30	C9	0.00000000e+000

## Patentansprüche:

1. Objektiv (611, 711), insbesondere ein Projektionsobjektiv für eine Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage (81), mit einer Mehrzahl von Linsen (L601-L630, L801-L817), mit mindestens einer Linse (1) aus Fluorid-Kristall,  
5      dadurch gekennzeichnet,  
daß die mindestens eine Linse (1) eine (100)-Linse mit einer Linsenachse (EA) ist, welche annähernd senkrecht auf den {100}-Kristallebenen oder auf den dazu äquivalenten Kristallebenen des Fluorid-Kristalls steht.
- 10    2. Objektiv (611, 711) nach Anspruch 1, wobei die (100)-Linse eine rotationssymmetrische Linse mit einer Symmetrieachse ist und die Symmetrieachse mit der Linsenachse (EA) der (100)-Linse zusammenfällt.
3. Objektiv (611, 711) nach einem der Ansprüche 1 bis 2 mit einer optischen Achse (OA), wobei die Linsenachse der (100)-Linse mit der optischen Achse (OA) des Objektivs  
15      (611, 711) zusammenfällt.
4. Objektiv (611, 711) nach einem der Ansprüche 1 bis 3, wobei innerhalb des Objektivs (611, 711) Lichtstrahlen von einer Objektebene (O) zu einer Bildebene (O') verlaufen und mindestens ein Lichtstrahl (609, 713, 715) innerhalb der (100)-Linse einen Strahlwinkel bezüglich der Linsenachse aufweist, der größer als 25°, insbesondere  
20      größer als 30° ist.
5. Objektiv (611, 711) nach einem der Ansprüche 1 bis 4, wobei innerhalb des Objektivs (611, 711) Lichtstrahlen von einer Objektebene (O) zu einer Bildebene (O') verlaufen und alle Lichtstrahlen innerhalb der (100)-Linse Strahlwinkel bezüglich der Linsenachse aufweisen, die maximal 45°, insbesondere maximal  $\arcsin\left(\frac{NA}{n_{FK}}\right)$   
25      betragen, wobei NA die bildseitige numerische Apertur bezeichnet und  $n_{FK}$  die Brechzahl des Fluorid-Kristalls.
6. Objektiv (611, 711) nach einem der Ansprüche 1 bis 5 mit einer Blendenebene (APE), wobei die Blendenebene (APE) einen Blendendurchmesser aufweist und wobei die

- (100)- Linse einen Linsendurchmesser aufweist und wobei der Linsendurchmesser kleiner als 85%, insbesondere kleiner als 80% des Blendendurchmessers ist.
7. Objektiv (611, 711) nach einem der Ansprüche 1 bis 6 mit einer Bildebene (O'), wobei die (100)- Linse (L630, L817) die der Bildebene (O') nächste Linse ist.
- 5 8. Objektiv (611, 711), insbesondere Projektionsobjektiv für eine Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage,  
mit mindestens zwei Linsen oder Linsenteilen aus Fluorid-Kristall,  
wobei die Linsen oder die Linsenteile Linsenachsen aufweisen, welche jeweils annähernd in eine Hauptkristallrichtung weisen,
- 10 wobei auf einen Bildpunkt in einer Bildebene (O') ein Strahlbüschel mit Strahlen trifft, welche jeweils einen Azimutwinkel  $\alpha_R$ , einen Öffnungswinkel  $\theta_R$  und einen optischen Wegunterschied  $\Delta OPL$  für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände aufweisen,  
dadurch gekennzeichnet,
- 15 daß die Linsen oder die Linsenteile gegeneinander um die Linsenachsen derart verdreht angeordnet sind, daß die Verteilung der optischen Wegunterschiede  $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$  des Strahlbüschels als Funktion des Azimutwinkels  $\alpha_R$  und des Öffnungswinkels  $\theta_R$  wesentlich reduzierte Werte aufweist im Vergleich zu Linsen oder Linsenteilen, deren Linsenachsen in die gleiche Hauptkristallrichtung weisen und die nicht gegeneinander
- 20 um die Linsenachsen verdreht angeordnet sind.
9. Objektiv (611, 711) nach Anspruch 8, wobei die optischen Wegunterschiede  $\Delta OPL$  als Funktion des Azimutwinkels  $\alpha_R$  für einen vorgegebenen Öffnungswinkel  $\theta_0$  weniger als 30%, insbesondere weniger als 20% variieren.
10. Objektiv (611, 711) nach einem der Ansprüche 8 oder 9, wobei die Linsen oder
- 25 Linsenteile jeweils eine Doppelbrechungsverteilung  $\Delta n(\alpha_L, \theta_L)$  aufweisen, deren Doppelbrechungswerte  $\Delta n$  von Azimutwinkeln  $\alpha_L$  bezüglich einer zur Linsenachse senkrecht stehenden Bezugsrichtung und von Öffnungswinkeln  $\theta_R$  bezüglich der Linsenachse abhängen,

wobei die Doppelbrechungsverteilung  $\Delta n(\alpha_L, \theta_L)$  eine k-zählige Azimutalsymmetrie aufweist,

wobei zwischen den Bezugsrichtungen der einzelnen Linsen oder Linsenteile Drehwinkel  $\gamma$  definiert sind,

- 5 wobei eine Anzahl von n Linsen oder n Linsenteilen eine Gruppe bilden, innerhalb derer die Linsenachsen in die gleiche Hauptkristallrichtung oder eine dazu äquivalente Hauptkristallrichtung weisen und innerhalb der die Doppelbrechungsverteilungen  $\Delta n(\alpha_L, \theta_L)$  bezüglich der Bezugsrichtungen den gleichen azimutalen Verlauf aufweisen, wobei für den Drehwinkel  $\gamma$  zwischen je zwei Linsen oder Linsenteilen einer Gruppe
- 10 gilt:

$$\gamma = \frac{360^\circ}{k \cdot n} + m \cdot \frac{360^\circ}{k} \pm 10^\circ,$$

wobei m eine ganze Zahl ist.

11. Objektiv nach Anspruch 10, wobei ein äußerster Aperturstrahl (609, 713, 715) des Strahlbüschels innerhalb der Linsen oder Linsenteile jeweils einen Öffnungswinkel  $\theta_L$
- 15 aufweist und wobei die Öffnungswinkel  $\theta_L$  innerhalb der Linsen oder Linsenteile der Gruppe maximal um 30%, insbesondere maximal um 20% variieren.
12. Objektiv (611, 711) nach einem der Ansprüche 10 oder 11, wobei ein äußerster Aperturstrahl (609, 713, 715) des Strahlbüschels innerhalb der Linsen oder Linsenteile jeweils einen Strahlweg  $RL_L$  zurücklegt und wobei die Strahlwege  $RL_L$  innerhalb der
- 20 Linsen oder Linsenteile der Gruppe maximal um 30%, insbesondere maximal um 20% variieren.
13. Objektiv (611, 711) nach einem der Ansprüche 10 bis 12, wobei die bei Drehwinkel  $\gamma = 0^\circ$  für die einzelnen Linsen oder Linsenteile einer Gruppe bestimmten optischen Wegunterschiede  $\Delta OPL$  für einen äußersten Aperturstrahl (609, 713, 715) des
- 25 Strahlbüschels maximal um 30%, insbesondere maximal um 20% variieren.
14. Objektiv (611, 711) nach einem der Ansprüche 10 bis 13, wobei die Gruppe 2 bis 4 Linsen oder Linsenteile umfaßt.
15. Objektiv (611, 711) nach Anspruch 14, wobei die Linsen (L629, L630) oder Linsenteile der Gruppe benachbart angeordnet sind, insbesondere aneinander angesprengt sind.

16. Objektiv (711) nach einem der Ansprüche 8 oder 9, wobei die Linsen oder Linsenteile jeweils eine Doppelbrechungsverteilung  $\Delta n(\alpha_L, \theta_L)$  aufweisen, deren Doppelbrechungswerte  $\Delta n$  von Azimutwinkeln  $\alpha_L$  bezüglich einer zur Linsenachse senkrecht stehenden Bezugsrichtung und von Öffnungswinkeln  $\theta_R$  bezüglich der Linsenachse abhängen,
- 5 wobei die Doppelbrechungsverteilung  $\Delta n(\alpha_L, \theta_L)$  eine k-zählige Azimutalsymmetrie aufweist,
- wobei zwischen den Bezugsrichtungen der einzelnen Linsen oder Linsenteile Drehwinkel  $\gamma$  definiert sind,
- 10 wobei eine Anzahl von n Untergruppen eine Gruppe bilden, innerhalb derer die Linsenachsen der Linsen oder Linsenteile in die gleiche Hauptkristallrichtung oder eine dazu äquivalente Hauptkristallrichtung weisen und innerhalb der die Doppelbrechungsverteilungen  $\Delta n(\alpha_L, \theta_L)$  bezüglich der Bezugsrichtungen den gleichen azimutalen Verlauf aufweisen,
- 15 wobei die n Untergruppen jeweils mindestens eine Linse oder ein Linsenteil aufweisen, wobei die Drehwinkel  $\gamma$  zwischen den Linsen oder Linsenteile einer Untergruppe
- $$\gamma = l \cdot \frac{360^\circ}{k} \pm 10^\circ$$
- betragen, wobei l eine ganze Zahl ist,
- wobei für den Drehwinkel  $\gamma$  zwischen je zwei Linsen oder Linsenteilen aus verschiedenen Untergruppen gilt:
- 20 
$$\gamma = \frac{360^\circ}{k \cdot n} + m \cdot \frac{360^\circ}{k} \pm 10^\circ,$$
- wobei m eine ganze Zahl ist.
17. Objektiv (611, 711) nach einem der Ansprüche 10 bis 16, wobei das Objektiv (611, 711) mindestens zwei Gruppen mit jeweils gegeneinander verdrehten Linsen oder Linsenteilen aufweist.
- 25 18. Objektiv (611, 711) nach einem der Ansprüche 8 bis 17, wobei die Linsenachsen in die <111>-Kristallrichtung oder dazu äquivalente Hauptkristallrichtungen weisen und die Doppelbrechungsverteilung  $\Delta n(\alpha_L, \theta_L)$  der Linsen oder Linsenteile eine 3-zählige Azimutalsymmetrie aufweist.

19. Objektiv (611, 711) nach einem der Ansprüche 8 bis 17, wobei die Linsenachsen in die  $\langle 100 \rangle$ -Kristallrichtung oder dazu äquivalente Hauptkristallrichtungen weisen und die Doppelbrechungsverteilung  $\Delta n(\alpha_L, \theta_L)$  der Linsen oder Linsenteile eine 4-zählige Azimutalsymmetrie aufweist.
- 5 20. Objektiv (611, 711) nach einem der Ansprüche 8 bis 17, wobei die Linsenachsen in die  $\langle 110 \rangle$ -Kristallrichtung oder dazu äquivalente Hauptkristallrichtungen weisen und die Doppelbrechungsverteilung  $\Delta n(\alpha_L, \theta_L)$  der Linsen oder Linsenteile eine 2-zählige Azimutalsymmetrie aufweist.
- 10 21. Objektiv (611, 711) nach einem der Ansprüche 8 bis 20, wobei die Linsenachsen der Linsen oder Linsenteile einer ersten Gruppe in die  $\langle 100 \rangle$ -Kristallrichtung oder in eine dazu äquivalente Hauptkristallrichtung weisen und die Linsenachsen der Linsen oder Linsenteile einer zweiten Gruppe in die  $\langle 111 \rangle$ -Kristallrichtung oder in eine dazu äquivalente Hauptkristallrichtung weisen.
- 15 22. Objektiv (611, 711) nach einem der Ansprüche 8 bis 20, wobei die Linsenachsen der Linsen oder Linsenteile einer ersten Gruppe in die  $\langle 100 \rangle$ -Kristallrichtung oder in eine dazu äquivalente Hauptkristallrichtung weisen und die Linsenachsen der Linsen oder Linsenteile einer zweiten Gruppe in die  $\langle 110 \rangle$ -Kristallrichtung oder in eine dazu äquivalente Hauptkristallrichtung weisen.
- 20 23. Objektiv (611, 711) nach Anspruch 21 oder 22, wobei sich die Verteilung der optischen Wegunterschiede  $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$  aus einer ersten Verteilung der optischen Wegunterschiede  $\Delta OPL_1(\alpha_R, \theta_R)$ , welche durch die Linsen oder Linsenteile von allen ersten Gruppen hervorgerufen wird, und einer zweiten Verteilung der optischen Wegunterschiede  $\Delta OPL_2(\alpha_R, \theta_R)$ , welche durch die Linsen oder Linsenteile von allen zweiten Gruppen hervorgerufen wird, zusammensetzt und sich der Betrag des
- 25 Maximalwerts der ersten Verteilung der optischen Wegunterschiede  $\Delta OPL_1(\alpha_R, \theta_R)$  maximal um 30%, insbesondere maximal um 20% vom Betrag des Maximalwertes der zweiten Verteilung der optischen Wegunterschiede  $\Delta OPL_2(\alpha_R, \theta_R)$  unterscheidet.
24. Objektiv (611) nach einem der Ansprüche 8 bis 23, wobei die Linsen oder Linsenteile zu einer Vielzahl von optischen Elementen mit optischen Flächen gehören, und wobei



- mindestens eine optische Fläche mit einer Kompensations-Beschichtung (613) belegt ist, wobei die Kompensations-Beschichtung (613) derart ausgelegt ist, daß die Verteilung der optischen Wegunterschiede  $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$  des Strahlbüschels als Funktion des Azimutwinkels  $\alpha_R$  und des Öffnungswinkels  $\theta_R$  wesentlich reduzierte Werte aufweist im Vergleich zu einem Objektiv ohne eine Kompensations-Beschichtung.
25. Objektiv (611) nach Anspruch 24, wobei das optische Element (L630) mit der Kompensations-Beschichtung (613) eine Elementachse aufweist, und wobei die Kompensations-Beschichtung (613) eine effektive Doppelbrechungsverteilung aufweist, deren effektive Doppelbrechungswerte von Azimutwinkeln  $\alpha_F$  bezüglich einer zur Elementachse senkrecht stehenden Bezugsrichtung und von Öffnungswinkeln  $\theta_F$  bezüglich der Elementachse abhängen.
26. Objektiv (611) nach Anspruch 25, wobei die effektive Doppelbrechungsverteilung der Kompensations-Beschichtung (613) für den Öffnungswinkel  $\theta_F=0^\circ$  annähernd Null ist.
27. Objektiv (611) nach einem der Ansprüche 25 und 26, wobei die effektive Doppelbrechungsverteilung primär nur vom Öffnungswinkel  $\theta_F$  abhängt.
28. Objektiv (611) nach einem der Ansprüche 24 bis 27, wobei das optische Element (L630) mit der Kompensations-Beschichtung (613) eine der Linsen aus Fluorid-Kristall ist, und wobei die Elementachse die Linsenachse der Linse aus Fluorid-Kristall ist.
29. Objektiv (611) nach einem der Ansprüche 24 bis 28, wobei mehrere optische Elemente mit Kompensations-Beschichtungen belegt sind.
30. Objektiv (611) nach einem der Ansprüche 24 bis 29, wobei alle optischen Elemente mit Kompensations-Beschichtungen belegt sind.
31. Objektiv (611, 711) nach einem der Ansprüche 1 bis 30, wobei der Fluorid-Kristall ein Kalzium-Fluorid-Kristall, ein Strontium-Fluorid-Kristall oder ein Barium-Fluorid-Kristall ist.
32. Objektiv (611), insbesondere Projektionsobjektiv für eine Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage, mit mehreren optischen Elementen, insbesondere Linsen aus Fluorid-Kristall, mit optischen Flächen,

- wobei auf einen Bildpunkt in einer Bildebene (O') ein Strahlbüschel mit Strahlen trifft, welche jeweils einen optischen Wegunterschied  $\Delta OPL$  für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände aufweisen, dadurch gekennzeichnet, dass mindestens eine optische Fläche mit einer Kompensations-Beschichtung (613) belegt ist, wobei die
- 5 Kompensations-Beschichtung derart ausgelegt ist, daß die optischen Wegunterschiede  $\Delta OPL$  des Strahlbüschels wesentlich reduzierte Werte aufweisen im Vergleich zu einem Objektiv ohne eine Kompensations-Beschichtung.
33. Objektiv (611) nach Anspruch 32, wobei das optische Element (L630) mit der Kompensations-Beschichtung (613) eine Elementachse aufweist, und wobei die
- 10 Kompensations-Beschichtung (613) eine effektive Doppelbrechungsverteilung aufweist, deren effektive Doppelbrechungswerte von Azimutwinkeln  $\alpha_F$  bezüglich einer zur Elementachse senkrecht stehenden Bezugsrichtung und von Öffnungswinkeln  $\theta_F$  bezüglich der Elementachse abhängen.
34. Objektiv (611) nach Anspruch 33, wobei die effektive Doppelbrechungsverteilung der
- 15 Kompensations-Beschichtung (613) für den Öffnungswinkel  $\theta_F=0^\circ$  annähernd Null ist.
35. Objektiv (611) nach einem der Ansprüche 33 und 34, wobei die effektive Doppelbrechungsverteilung der Kompensations-Beschichtung (613) primär vom Öffnungswinkel  $\theta_F$  abhängt.
36. Objektiv (611) nach einem der Ansprüche 33 bis 37, wobei das optische Element
- 20 (L630) mit der Kompensations-Beschichtung (613) austauschbar ist.
37. Objektiv (611) nach einem der Ansprüche 32 bis 36, wobei mindestens zwei optische Elemente Linsen oder Linsenteile aus Fluorid-Kristall sind, wobei die Linsen oder die Linsenteile Linsenachsen aufweisen,
- wobei die Linsen oder die Linsenteile gegeneinander um die Linsenachsen derart
- 25 verdreht angeordnet sind, daß die Verteilung der optischen Wegunterschiede  $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$  des Strahlbüschels als Funktion des Azimutwinkels  $\alpha_R$  und des Öffnungswinkels  $\theta_R$  wesentlich reduzierte Werte aufweist im Vergleich zu Linsen oder Linsenteilen, deren Linsenachsen in die gleiche Hauptkristallrichtung weisen und die nicht gegeneinander um die Linsenachsen verdreht angeordnet sind.

38. Objektiv (611) nach Anspruch 37, wobei die optischen Wegunterschiede  $\Delta OPL$  als Funktion des Azimutwinkels  $\alpha_R$  für einen vorgegebenen Öffnungswinkel  $\theta_0$  weniger als 30%, insbesondere weniger als 20% variieren.
39. Objektiv (611) nach einem der Ansprüche 37 oder 38, wobei die Linsen oder  
 5 Linsenteile jeweils eine Doppelbrechungsverteilung  $\Delta n(\alpha_L, \theta_L)$  aufweisen, deren Doppelbrechungswerte  $\Delta n$  von Azimutwinkeln  $\alpha_L$  bezüglich einer zur Linsenachse senkrecht stehenden Bezugsrichtung und von Öffnungswinkeln  $\theta_R$  bezüglich der Linsenachse abhängen,  
 wobei die Doppelbrechungsverteilung  $\Delta n(\alpha_L, \theta_L)$  eine k-zählige Azimutalsymmetrie  
 10 aufweist,  
 wobei zwischen den Bezugsrichtungen der einzelnen Linsen oder Linsenteile Drehwinkel  $\gamma$  definiert sind,  
 wobei eine Anzahl von n Linsen oder n Linsenteilen eine Gruppe bilden, innerhalb derer die Linsenachsen in die gleiche Hauptkristallrichtung oder eine dazu äquivalente  
 15 Hauptkristallrichtung weisen und innerhalb der die Doppelbrechungsverteilungen  $\Delta n(\alpha_L, \theta_L)$  bezüglich der Bezugsrichtungen den gleichen azimutalen Verlauf aufweisen,  
 wobei für den Drehwinkel  $\gamma$  zwischen je zwei Linsen oder Linsenteilen einer Gruppe gilt:  

$$\gamma = \frac{360^\circ}{k \cdot n} + m \cdot \frac{360^\circ}{k} \pm 10^\circ,$$
  
 20 wobei m eine ganze Zahl ist.
40. Objektiv (611) nach einem der Ansprüche 37 oder 38, wobei die Linsen oder  
 Linsenteile jeweils eine Doppelbrechungsverteilung  $\Delta n(\alpha_L, \theta_L)$  aufweisen, deren Doppelbrechungswerte  $\Delta n$  von Azimutwinkeln  $\alpha_L$  bezüglich einer zur Linsenachse senkrecht stehenden Bezugsrichtung und von Öffnungswinkeln  $\theta_R$  bezüglich der  
 25 Linsenachse abhängen,  
 wobei die Doppelbrechungsverteilung  $\Delta n(\alpha_L, \theta_L)$  eine k-zählige Azimutalsymmetrie aufweist,

- wobei zwischen den Bezugsrichtungen der einzelnen Linsen oder Linsenteile Drehwinkel  $\gamma$  definiert sind,
- wobei eine Anzahl von  $n$  Untergruppen eine Gruppe bilden, innerhalb derer die Linsenachsen der Linsen oder Linsenteile in die gleiche Hauptkristallrichtung oder eine dazu äquivalente Hauptkristallrichtung weisen und innerhalb der die Doppelbrechungsverteilungen  $\Delta n(\alpha_L, \theta_L)$  bezüglich der Bezugsrichtungen den gleichen azimutalen Verlauf aufweisen,
- wobei die  $n$  Untergruppen jeweils mindestens eine Linse oder ein Linsenteil aufweisen, wobei die Drehwinkel  $\gamma$  zwischen den Linsen oder Linsenteile einer Untergruppe
- 10  $\gamma = l \cdot \frac{360^\circ}{k} \pm 10^\circ$  betragen, wobei  $l$  eine ganze Zahl ist,
- wobei für den Drehwinkel  $\gamma$  zwischen je zwei Linsen oder Linsenteilen aus verschiedenen Untergruppen gilt:
- $$\gamma = \frac{360^\circ}{k \cdot n} + m \cdot \frac{360^\circ}{k} \pm 10^\circ,$$
- wobei  $m$  eine ganze Zahl ist.
- 15 41. Objektiv (611) nach einem der Ansprüche 37 bis 40, wobei das optische Element (L630) mit der Kompensations-Beschichtung (613) eine der Linsen aus Fluorid-Kristall ist, und wobei die Elementachse die Linsenachse der Linse aus Fluoridkristall ist.
42. Objektiv (611) nach einem der Ansprüche 32 bis 41, wobei mehrere optische Elemente mit Kompensations-Beschichtungen belegt sind.
- 20 43. Objektiv (611, 711) nach einem der Ansprüche 1 bis 42, wobei das Objektiv (611, 711) eine bildseitige numerische Apertur NA aufweist und die bildseitige numerische Apertur NA größer als 0.7, insbesondere größer als 0.8 ist.
44. Objektiv (611, 711) nach einem der Ansprüche 1 bis 43, wobei das Objektiv (611, 711) für Wellenlängen kleiner 200nm ausgelegt ist.
- 25 45. Objektiv (611, 711) nach einem der Ansprüche 1 bis 44, wobei das Objektiv (611, 711) für Wellenlängen kleiner 160nm ausgelegt ist.
46. Objektiv (611) nach einem der Ansprüche 1 bis 45, wobei das Objektiv (611) ein refraktives Objektiv ist.

47. Objektiv (711) nach einem der Ansprüche 1 bis 45, wobei das Objektiv (711) ein katadioptrisches Objektiv (711) mit Linsen und mindestens einem Spiegel (Sp2) ist.
48. Objektiv (611, 711) nach einem der Ansprüche 1 bis 47, wobei alle Linsen aus Kalzium-Fluorid sind.
- 5 49. Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage (81), umfassend ein Beleuchtungssystem (83), ein Objektiv (85) nach einem der Ansprüche 1 bis 48, das eine Struktur tragende Maske (89) auf ein lichtempfindliches Substrat (815) abbildet.
- 10 50. Verfahren zur Herstellung von Halbleiter-Bauelementen mit einer Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage (81) nach Anspruch 49.
51. Verfahren zur Herstellung von Objektiven (611, 711), insbesondere von Projektionsobjektiven für eine Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage, mit mindestens zwei Linsen oder Linsenteilen aus Fluorid-Kristall, wobei die Linsen oder die Linsenteile Linsenachsen aufweisen, welche jeweils
- 15 annähernd in eine Hauptkristallrichtung weisen, dadurch gekennzeichnet, daß für ein Strahlbüschel mit Strahlen, welche jeweils einen Azimutwinkel  $\alpha_R$ , einen Öffnungswinkel  $\theta_R$  und einen optischen Wegunterschied  $\Delta OPL$  für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände in einer Bildebene aufweisen, die Verteilung
- 20 der optischen Wegunterschiede  $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$  für Linsen oder Linsenteile bestimmt wird, daß die Linsen oder die Linsenteile gegeneinander um die Linsenachsen derart verdreht angeordnet werden, daß die Verteilung der optischen Wegunterschiede  $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$  des Strahlbüschels wesentlich reduzierte Werte aufweist im Vergleich zu Linsen oder
- 25 Linsenteilen, deren Linsenachsen in die gleiche Hauptkristallrichtung weisen und die nicht gegeneinander um die Linsenachsen verdreht angeordnet sind.
52. Verfahren nach Anspruch 51, wobei das Objektiv (611, 711) eine erste Gruppe mit Linsen oder Linsenteilen und eine zweite Gruppe mit Linsen oder Linsenteilen aufweist und die Linsenachsen der Linsen oder Linsenteile der ersten Gruppe in die  $\langle 100 \rangle$ -
- 30 Kristallrichtung oder in eine dazu äquivalente Hauptkristallrichtung weisen und die

- Linsenachsen der Linsen oder Linsenteile der zweiten Gruppe in die  $\langle 111 \rangle$ -Kristallrichtung oder in eine dazu äquivalente Hauptkristallrichtung weisen.
53. Verfahren nach Anspruch 51, wobei das Objektiv (611, 711) eine erste Gruppe mit Linsen oder Linsenteilen und eine zweite Gruppe mit Linsen oder Linsenteilen aufweist und die Linsenachsen der Linsen oder Linsenteile der ersten Gruppe in die  $\langle 100 \rangle$ -Kristallrichtung oder in eine dazu äquivalente Hauptkristallrichtung weisen und die Linsenachsen der Linsen oder Linsenteile der zweiten Gruppe in die  $\langle 110 \rangle$ -Kristallrichtung oder in eine dazu äquivalente Hauptkristallrichtung weisen.
54. Verfahren nach einem der Ansprüche 51 bis 53,
- 10 wobei für ein Strahlbüschel mit Strahlen, welche jeweils einen Azimutwinkel  $\alpha_R$ , einen Öffnungswinkel  $\theta_R$  und einen optischen Wegunterschied  $\Delta OPL$  für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände in einer Bildebene aufweisen, eine Verteilung der optischen Wegunterschiede  $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$ , wobei aus der Verteilung der optischen Wegunterschiede  $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$  eine effektive
- 15 Doppelbrechungsverteilung einer Kompensations-Beschichtung zur Reduzierung der optischen Wegunterschiede  $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$  bestimmt wird, wobei die effektive Doppelbrechungswerte der Kompensations-Beschichtung von Azimutwinkeln  $\alpha_F$  bezüglich einer zu einer Elementachse des optischen Elements senkrecht stehenden Bezugsrichtung und von Öffnungswinkeln  $\theta_F$  bezüglich der
- 20 Elementachse abhängen, wobei aus der Doppelbrechungsverteilung der Aufbau einer Kompensations-Beschichtung (613) bestimmt wird, und wobei ein optisches Element (L630) des Objektivs (611) mit der Kompensations-Beschichtung (613) belegt wird.
- 25 55. Verfahren zur Kompensation von Doppelbrechungs-Effekten in Objektiven (611), insbesondere in Projektionsobjektiven für eine Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage, wobei das Objektiv (611) mehrere optische Elemente, insbesondere Linsen aus Fluorid-Kristall, mit optischen Flächen aufweist, wobei mindestens ein optisches Element (L630) austauschbar ist,

- wobei auf einen Bildpunkt in einer Bildebene ( $O'$ ) ein Strahlbüschel mit Strahlen trifft, welche jeweils einen Azimutwinkel  $\alpha_R$ , einen Öffnungswinkel  $\theta_R$  und einen optischen Wegunterschied  $\Delta OPL$  für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände in einer Bildebene aufweisen,
- 5 wobei eine Verteilung der optischen Wegunterschiede  $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$  bestimmt wird, wobei aus der Verteilung der optischen Wegunterschiede  $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$  eine effektive Doppelbrechungsverteilung einer Kompensations-Beschichtung (613) bestimmt wird, deren effektive Doppelbrechungswerte von Azimutwinkeln  $\alpha_F$  bezüglich einer zu einer Elementachse des optischen Elements senkrecht stehenden Bezugsrichtung und von
- 10 Öffnungswinkeln  $\theta_F$  bezüglich der Elementachse abhängen, wobei aus der effektiven Doppelbrechungsverteilung der Aufbau einer Kompensations-Beschichtung (613) bestimmt wird, wobei das austauschbare optische Element (L630) aus dem Objektiv entfernt wird, wobei das austauschbare optische Element (L630) mit der Kompensations-
- 15 Beschichtung (613) belegt wird und wobei das austauschbare optische Element (L630) mit der Kompensations-Beschichtung (613) wieder in das Objektiv (611) eingebaut wird.
56. Linsenherstellverfahren, dadurch gekennzeichnet, daß mehrere Platten aus gegeneinander hinsichtlich der Kristallorientierung verdrehtem Kristallmaterial,
- 20 vorzugsweise Fluorid-Kristall und insbesondere Kalziumfluorid, optisch nahtlos gefügt, insbesondere angesprengt werden und anschließend als ein einheitliches Blank formgebend bearbeitet und poliert werden.
57. Linsenherstellverfahren nach Anspruch 56, wobei die Platten jeweils eine Doppelbrechungsverteilung  $\Delta n(\alpha_L, \theta_L)$  aufweisen, deren Doppelbrechungswerte  $\Delta n$
- 25 von Azimutwinkeln  $\alpha_L$  bezüglich einer zur Linsenachse senkrecht stehenden Bezugsrichtung und von Öffnungswinkeln  $\theta_R$  bezüglich der Linsenachse abhängen und welche eine k-zählige Azimutalsymmetrie aufweist, wobei für eine Anzahl von n Platten die Flächennormalen in die gleiche Hauptkristallrichtung oder eine dazu äquivalente Hauptkristallrichtung weisen und die

Doppelbrechungsverteilungen  $\Delta n(\alpha_L, \theta_L)$  bezüglich der Bezugsrichtungen den gleichen azimutalen Verlauf aufweisen,

wobei zwischen den Bezugsrichtungen der einzelnen Platten Drehwinkel  $\gamma$  definiert sind, wobei für den Drehwinkel  $\gamma$  zwischen je zwei Platten gilt:

$$5 \quad \gamma = \frac{360^\circ}{k \cdot n} + m \cdot \frac{360^\circ}{k} \pm 10^\circ,$$

wobei  $m$  eine ganze Zahl ist.

58. Linsenherstellverfahren nach Anspruch 57, wobei zwei Platten nahtlos gefügt werden.

59. Linsenherstellverfahren nach einem der Ansprüche 57 und 58, wobei die Platten annähernd gleiche Dicke aufweisen.

10 60. Linsenherstellverfahren nach einem der Ansprüche 56 bis 59, wobei bei ersten Platten die Flächennormalen in die  $\langle 111 \rangle$ -Kristallrichtung oder in eine dazu äquivalente Hauptkristallrichtung weisen und bei zweiten Platten die Flächennormalen in die  $\langle 100 \rangle$ -Kristallrichtung oder in eine dazu äquivalente Hauptkristallrichtung weisen.

15 61. Linsenherstellverfahren nach Anspruch 60, wobei die ersten Platten eine annähernd gleiche erste Dicke aufweisen und die zweiten Platten eine annähernd gleiche zweite Dicke aufweisen und das Verhältnis der Summe der ersten Dicken zur Summe der zweiten Dicken  $1.5 \pm 0.2$  ist.

20 62. Linsenherstellverfahren nach einem der Ansprüche 56 bis 59, wobei bei ersten Platten die Flächennormalen in die  $\langle 110 \rangle$ -Kristallrichtung oder in eine dazu äquivalente Hauptkristallrichtung weisen und bei zweiten Platten die Flächennormalen in die  $\langle 100 \rangle$ -Kristallrichtung oder in eine dazu äquivalente Hauptkristallrichtung weisen.

25 63. Linsenherstellverfahren nach Anspruch 62, wobei die ersten Platten eine annähernd gleiche erste Dicke aufweisen und die zweiten Platten eine annähernd gleiche zweite Dicke aufweisen und das Verhältnis der Summe der ersten Dicken zur Summe der zweiten Dicken  $4.0 \pm 0.4$  ist.

64. Linsenherstellverfahren nach einem der Ansprüche 62 und 63, wobei zwei erste Platten mit einer zweiten Platte optisch nahtlos gefügt werden.

65. Linsenherstellverfahren nach einem der Ansprüche 62 und 63, wobei vier erste Platten mit zwei zweiten Platte optisch nahtlos gefügt werden.



66. Linse, gekennzeichnet durch die Herstellung nach einem der Ansprüche 56 bis 65.
67. Objektiv (611, 711), insbesondere ein Projektionsobjektiv für eine Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage (81), dadurch gekennzeichnet, daß es eine Linse nach Anspruch 66 umfaßt.
- 5 68. Objektiv (611, 711) nach mindestens einem der Ansprüche 1 bis 48, dadurch gekennzeichnet, daß es eine Linse (L629, L630) nach Anspruch 66 umfaßt.
69. Verfahren zur Herstellung eines optischen Rohlings aus einem Kristallmaterial mit kubischer Kristallstruktur als Vorstufe zur Herstellung einer Linse oder eines Linsenteils für ein Objektiv (611, 711), insbesondere ein Projektionsobjektiv für eine
- 10 Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage, gekennzeichnet durch folgende Verfahrensschritte:
- a) Bestimmen der Orientierung einer definiert innerhalb der Kristallstruktur orientierten ersten Kristallrichtung;
  - 15 b) Bearbeiten des optischen Rohlings derart, dass die erste Kristallrichtung nahezu senkrecht auf einer optischen Roh-Fläche des optischen Rohlings steht;
  - c) Bestimmen einer Bezugsrichtung, welche senkrecht auf der ersten Kristallrichtung steht, wobei die Bezugsrichtung eine Projektion einer zweiten Kristallrichtung in eine zur ersten Kristallrichtung senkrecht liegende Ebene darstellt, und wobei die erste Kristallrichtung zur zweiten Kristallrichtung einen von Null verschiedenen
  - 20 Winkel einnimmt;
  - d) Markieren der Bezugsrichtung auf dem optischen Rohling oder auf einer Haltefassung des optischen Rohlings.
70. Verfahren nach Anspruch 69, wobei die Lage der ersten Kristallrichtung durch Messen der Richtung eines Bragg-Reflexes einer dieser ersten Kristallrichtung zugeordneten
- 25 ersten Kristallebenenschar bestimmt wird.
71. Verfahren nach Anspruch 70, wobei die Lage der ersten Kristallachse durch das Vergleichen der gemessenen Richtungen von Bragg-Reflexen der Kristallebenenschar bei mehreren Messpositionen bestimmt wird, welche bezüglich einer auf einer optischen Eintrittsfläche des Rohlings senkrecht stehenden Achse gegeneinander
- 30 verdreht sind.

72. Verfahren nach einem der Ansprüche 69 bis 71, wobei die erste Kristallrichtung in  $\langle 100 \rangle$ -Kristallrichtung oder in  $\langle 111 \rangle$ -Kristallrichtung oder in  $\langle 110 \rangle$ -Kristallrichtung oder eine zu diesen Kristallrichtungen äquivalente Kristallrichtung weist.
73. Verfahren nach einem der Ansprüche 69 bis 72, wobei das Kristallmaterial Kalzium-  
5 Fluorid, Strontium-Fluorid oder Barium-Fluorid ist.
74. Verfahren nach einem der Ansprüche 69 bis 73, wobei die Lage der Bezugsrichtung durch Messen der Richtung eines Bragg-Reflexes einer der zweiten Kristallachse zugeordneten Kristallebenenschar bestimmt wird.
75. Verfahren nach einem der Ansprüche 69 bis 73, wobei die Lage der Bezugsrichtung mit  
10 Hilfe des Laue-Verfahrens bestimmt wird.
76. Verfahren nach einem der Ansprüche 69 bis 75, wobei ein Lichtstrahl, dessen Projektion in eine zur ersten Kristallrichtung senkrecht liegenden Ebene parallel zur Bezugsrichtung ist, einen maximalen oder einen minimalen optischen Wegunterschied für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände erfährt.
- 15 77. Verfahren nach einem der Ansprüche 69 bis 76, wobei die erste Kristallachse in  $\langle 100 \rangle$ -Kristallrichtung oder in  $\langle 111 \rangle$ -Kristallrichtung oder in eine dazu äquivalente Kristallrichtung weist, und wobei die Projektion der zweiten Kristallrichtung in eine zur ersten Kristallrichtung senkrecht liegenden Ebene parallel zur Projektion der  $\langle 110 \rangle$ -Kristallrichtung oder einer dazu äquivalenten Kristallrichtung in eine zur ersten  
20 Kristallrichtung senkrecht liegenden Ebene ist.
78. Verfahren nach einem der Ansprüche 72 bis 77, wobei die erste Kristallachse in  $\langle 111 \rangle$ -Kristallrichtung oder eine dazu äquivalente Kristallrichtung und die zweite Kristallrichtung in  $\langle 331 \rangle$ -Kristallrichtung oder eine dazu äquivalente Kristallrichtung weist.
- 25 79. Verfahren nach einem der Ansprüche 70 bis 78, wobei diejenigen Materialbereiche des optischen Rohlings, die von Bragg-Meßstrahlung durchtreten wurden, abgetragen werden.
80. Optischer Rohling aus einem Kristallmaterial mit kubischer Kristallstruktur als Ausgangsprodukt zur Herstellung einer Linse oder eines Linsenteils für ein Objektiv

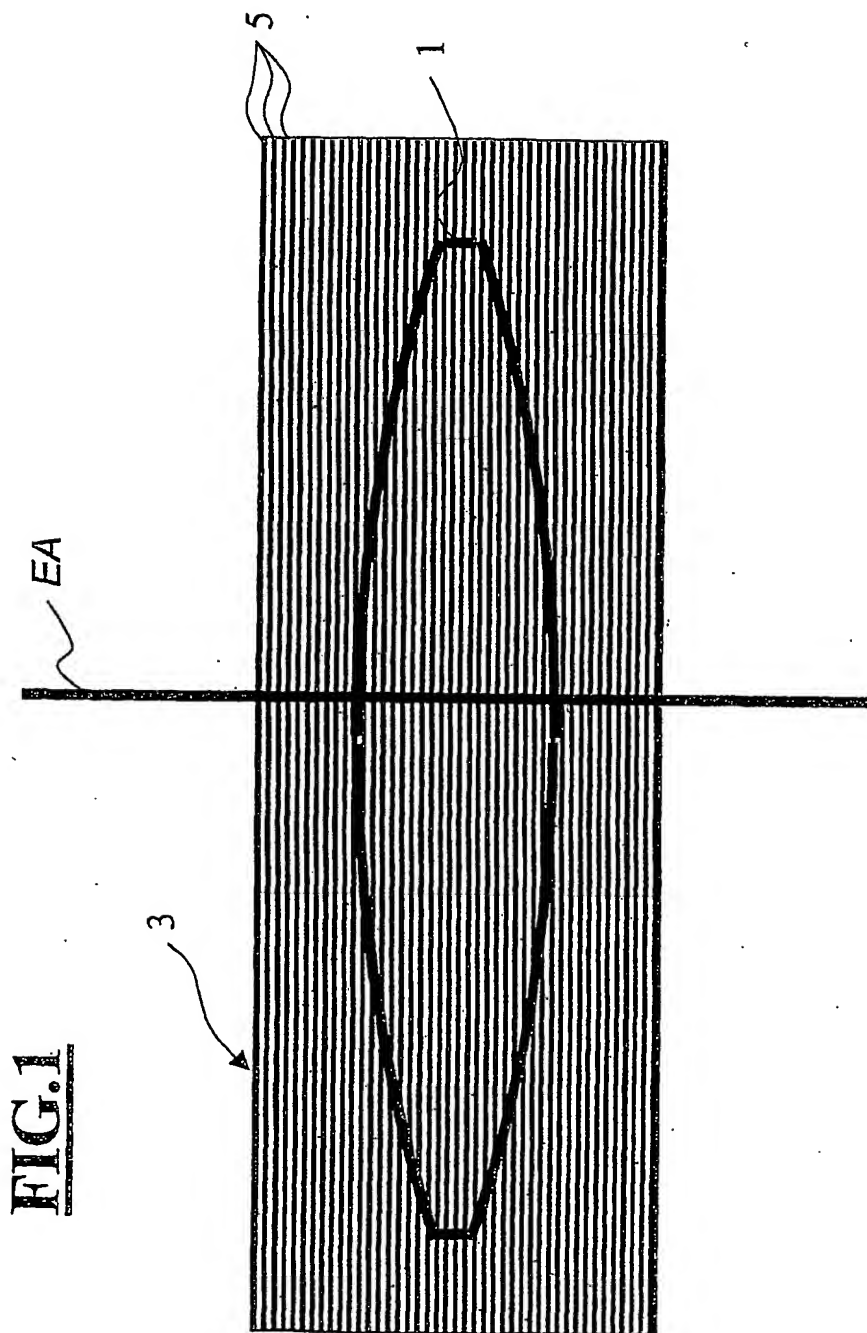
- (611, 711), insbesondere für ein Projektionsobjektiv für eine Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage,  
wobei der optische Rohling oder eine Haltefassung des optischen Rohlings eine Markierung aufweist, welche eine Bezugsrichtung markiert, welche senkrecht auf der  
5 ersten Kristallrichtung steht und eine Projektion einer zweiten Kristallrichtung in eine zur ersten Kristallrichtung senkrecht liegende Ebene darstellt, wobei die erste Kristallrichtung zur zweiten Kristallrichtung einen von Null verschiedenen Winkel einnimmt.
81. Optischer Rohling nach Anspruch 80, hergestellt nach einem Verfahren gemäß einem  
10 der Ansprüche 69 bis 79.
82. Verfahren zur Herstellung einer Linse oder eines Linsenteils aus einem optischem Rohling nach einem der Ansprüche 80 oder 81, gekennzeichnet durch folgenden Verfahrensschritt:
- e) Formen der Linse oder des Linsenteils derart, dass die Richtung der ersten  
15 Kristallachse nahezu parallel zu einer Linsenachse ist.
83. Verfahren zur Herstellung einer Linse oder eines Linsenteils aus einem optischen Rohling aus einem Kristallmaterial mit kubischer Kristallstruktur, gekennzeichnet durch folgende Verfahrensschritte:
- a1) Formen der Linse oder des Linsenteils derart, dass die Richtung einer definiert  
20 innerhalb der Kristallstruktur orientierten ersten Kristallachse nahezu parallel zu einer Linsenachse ist;
- b1) Bestimmen einer Bezugsrichtung, welche senkrecht auf der ersten Kristallrichtung steht, wobei die Bezugsrichtung eine Projektion einer zweiten Kristallrichtung in eine zur ersten Kristallrichtung senkrecht liegende Ebene darstellt, und wobei die  
25 erste Kristallrichtung zur zweiten Kristallrichtung einen von Null verschiedenen Winkel einnimmt;
- c1) Markieren der Bezugsrichtung auf der Linse oder dem Linsenteil oder auf einer Haltefassung der Linse oder des Linsenteils.

84. Verfahren nach Anspruch 83, wobei die erste Kristallrichtung in  $\langle 100 \rangle$ -Kristallrichtung oder in  $\langle 111 \rangle$ -Kristallrichtung oder in  $\langle 110 \rangle$ -Kristallrichtung oder eine zu diesen Kristallrichtungen äquivalente Kristallrichtung weist.
85. Verfahren nach einem der Ansprüche 83 oder 84, wobei das Kristallmaterial Kalzium-Fluorid, Strontium-Fluorid oder Barium-Fluorid ist.
86. Verfahren nach einem der Ansprüche 83 bis 85, wobei die Lage der Bezugsrichtung durch Messen der Richtung eines Bragg-Reflexes einer der zweiten Kristallachse zugeordneten Kristallebenenschar bestimmt wird.
87. Verfahren nach einem der Ansprüche 83 bis 86, wobei die Lage der Bezugsrichtung mit Hilfe des Laue-Verfahrens bestimmt wird.
88. Verfahren nach einem der Ansprüche 83 bis 87, wobei ein Lichtstrahl, dessen Projektion in eine zur ersten Kristallrichtung senkrecht liegenden Ebene parallel zur Bezugsrichtung ist, einen maximalen oder einen minimalen optischen Wegunterschied für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände erfährt.
89. Verfahren nach einem der Ansprüche 83 bis 88, wobei die erste Kristallachse in  $\langle 100 \rangle$ -Kristallrichtung oder in  $\langle 111 \rangle$ -Kristallrichtung oder in eine dazu äquivalente Kristallrichtung weist, und wobei die Projektion der zweiten Kristallrichtung in eine zur ersten Kristallrichtung senkrecht liegenden Ebene parallel zur Projektion der  $\langle 110 \rangle$ -Kristallrichtung oder einer dazu äquivalenten Kristallrichtung in eine zur ersten Kristallrichtung senkrecht liegenden Ebene ist.
90. Verfahren nach einem der Ansprüche 86 bis 89, wobei beim Formen diejenigen Materialbereiche der Linse oder des Linsenteils, die von Bragg-Meßstrahlung durchtreten wurden, abgetragen werden.
91. Linse oder Linsenteil für ein Objektiv (611, 711), insbesondere für ein Projektionsobjektiv für eine Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage, wobei eine Linsenachse der Linse oder des Linsenteils in Richtung einer ersten Kristallachse weist, wobei die Linse oder das Linsenteil oder eine Haltefassung der Linse oder des Linsenteils eine Markierung aufweist, welche eine Bezugsrichtung markiert, welche senkrecht auf der ersten Kristallrichtung steht und eine Projektion einer zweiten

Kristallrichtung in eine zur ersten Kristallrichtung senkrecht liegende Ebene darstellt, wobei die erste Kristallrichtung zur zweiten Kristallrichtung einen von Null verschiedenen Winkel einnimmt.

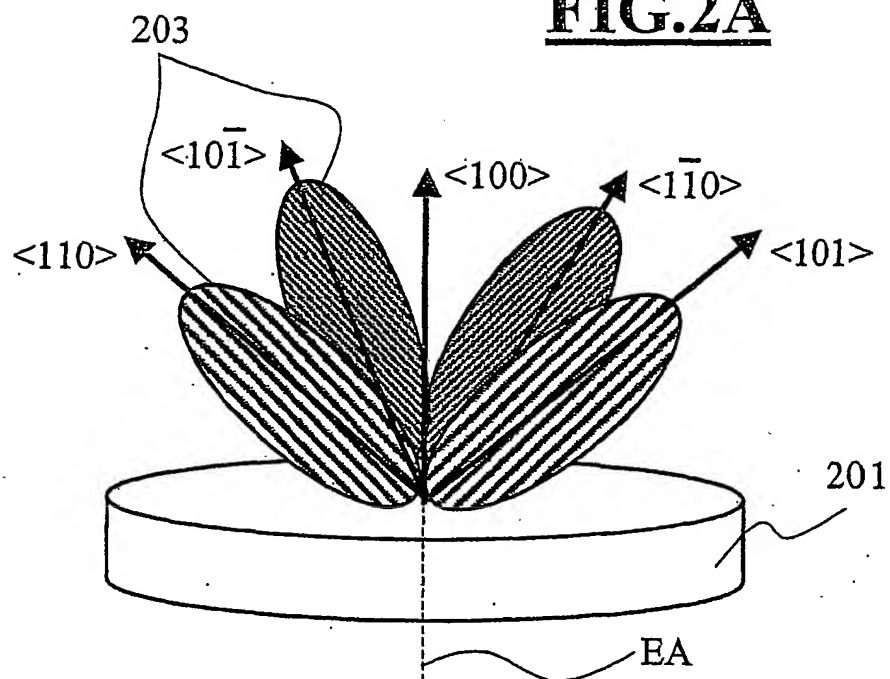
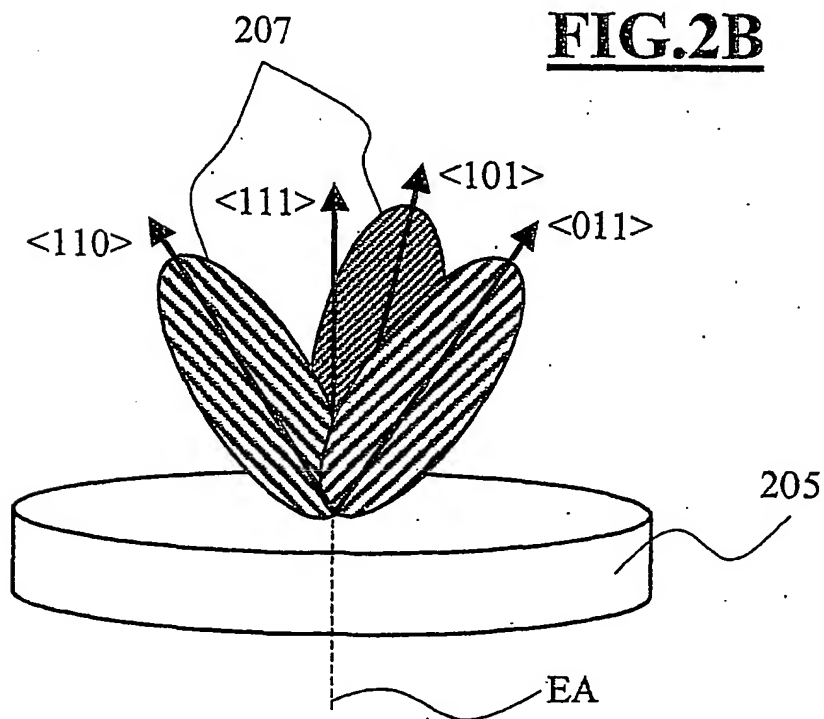
- 5 92. Linse oder Linsenteil nach Anspruch 91, wobei die Linse oder das Linsenteil nach einem der Ansprüche 82 bis 90 hergestellt wird.
93. Objektiv (611, 711) nach einem der Ansprüche 8 bis 48, wobei das Objektiv (611, 711) eine Linse oder ein Linsenteil nach einem der Ansprüche 91 oder 92 umfasst.

1/16

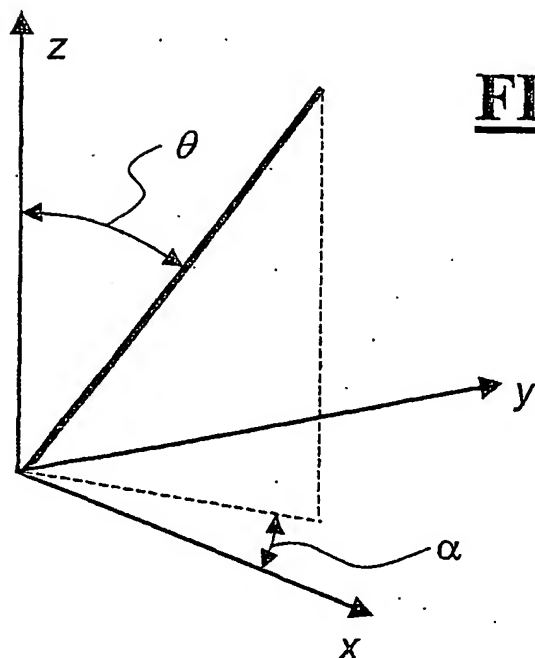
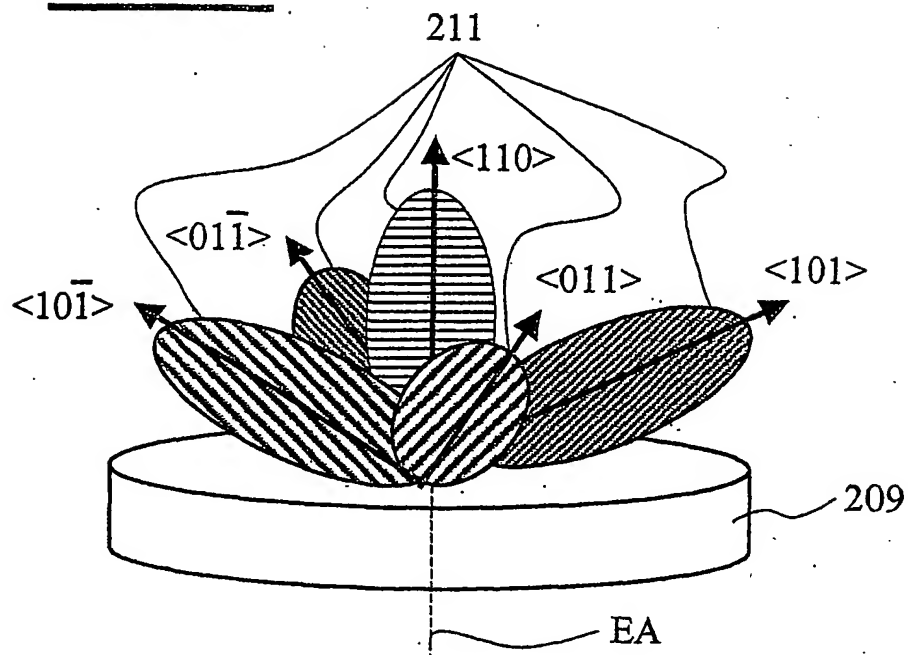


**FIG. 1**

2/16

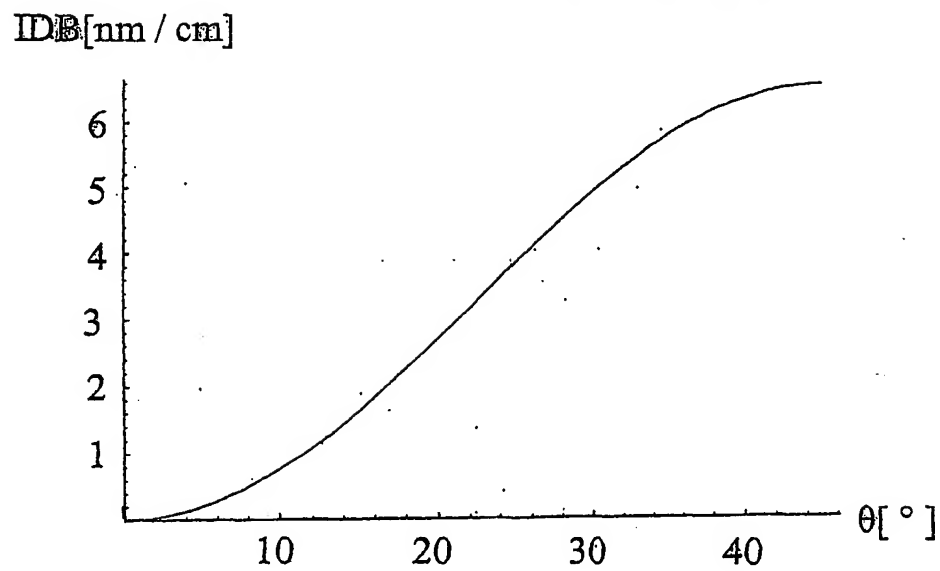
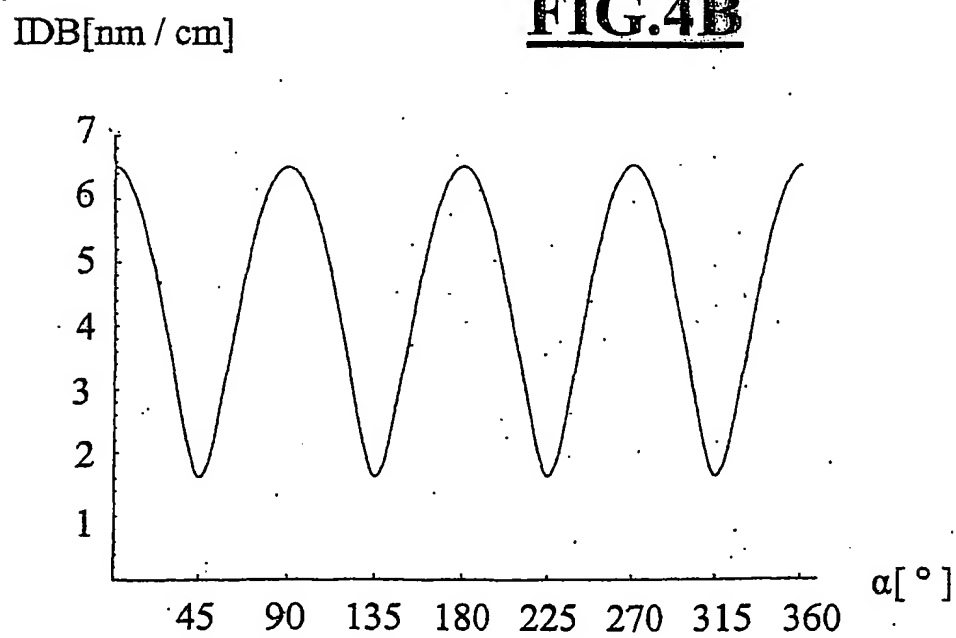
**FIG.2A****FIG.2B**

3/16

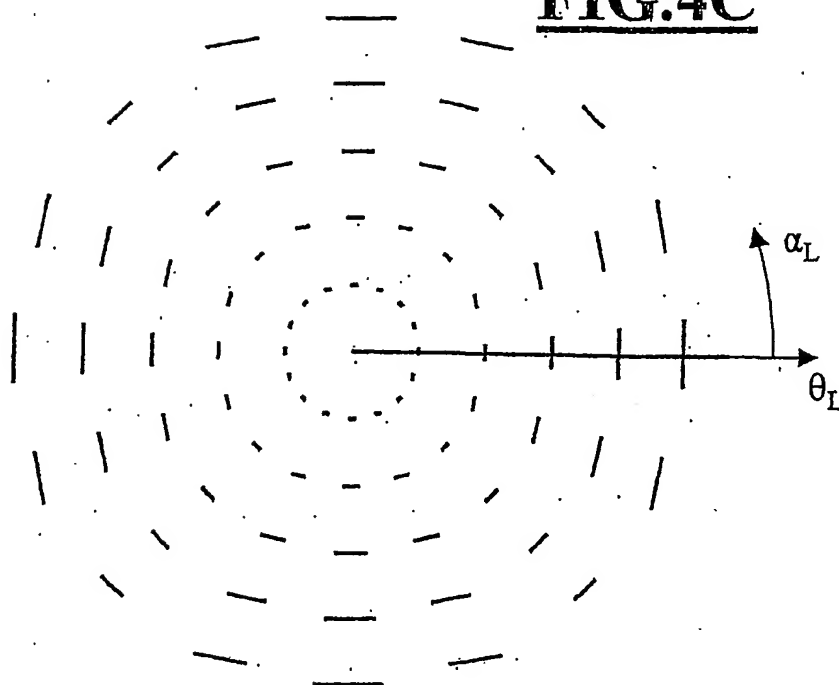
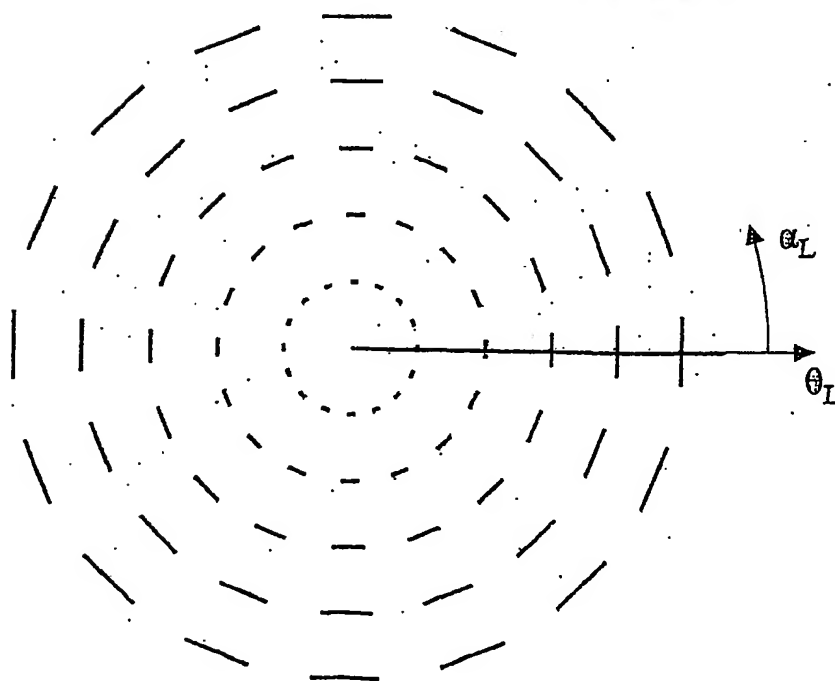
**FIG.2C****FIG.3**



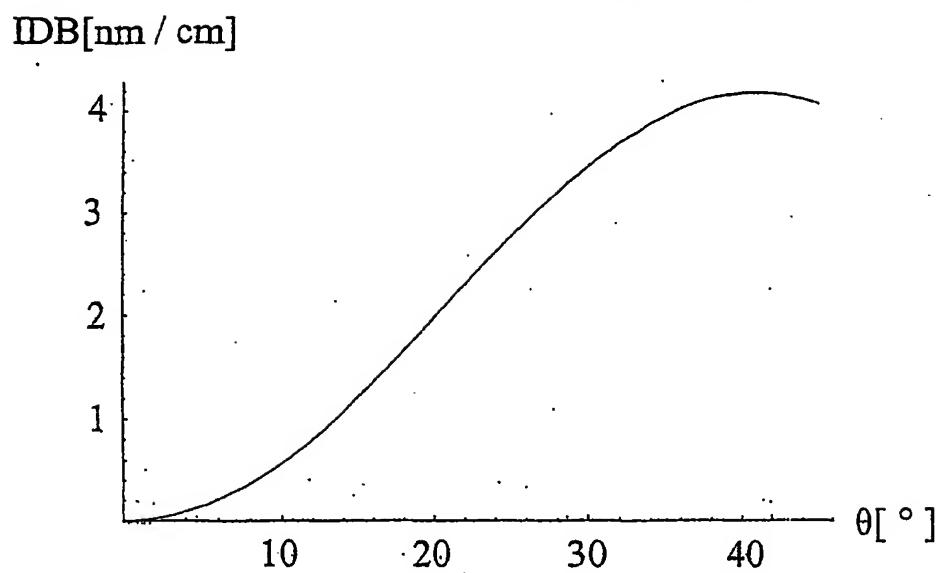
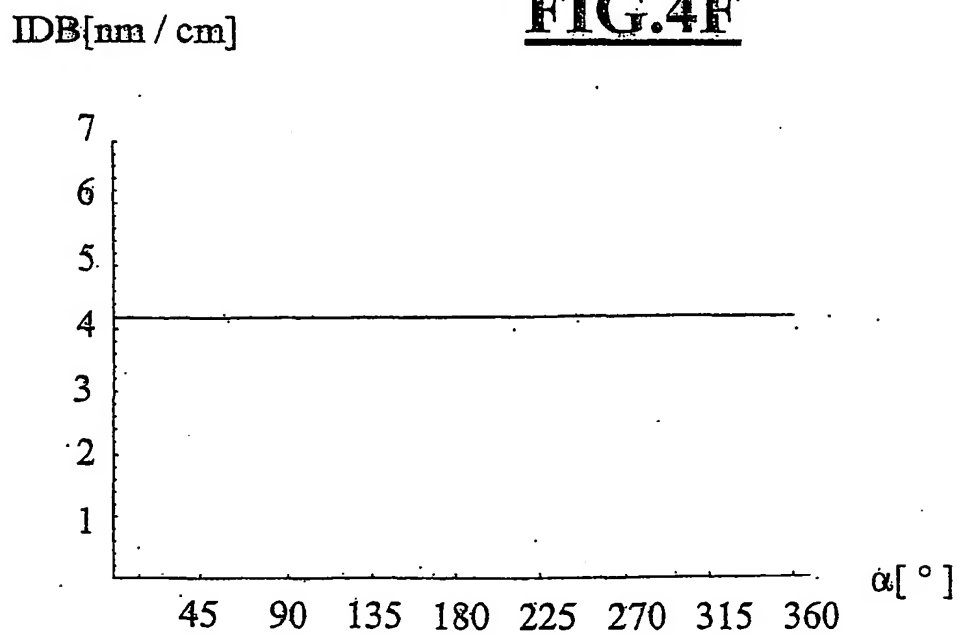
4/16

**FIG.4A****FIG.4B**

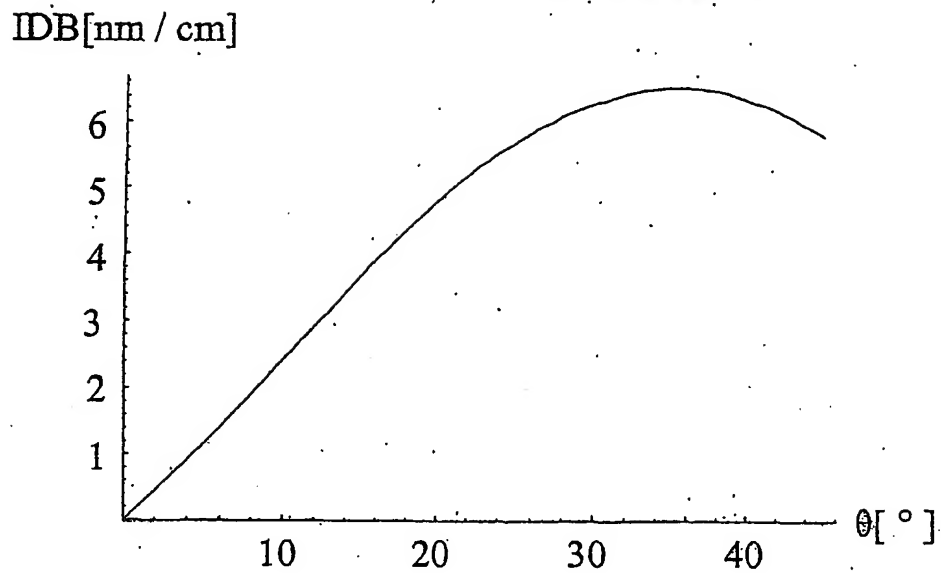
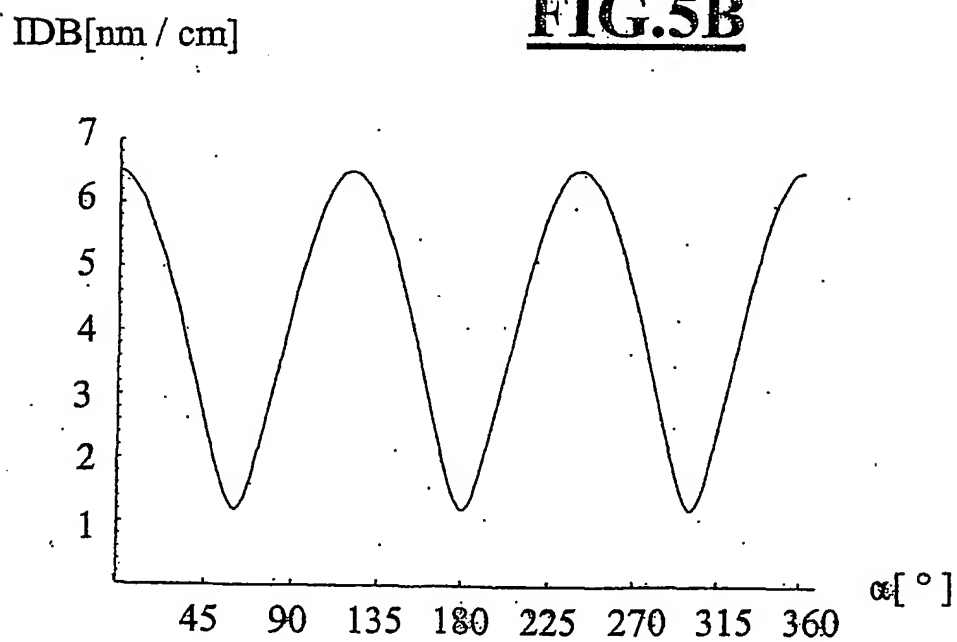
5/16

**FIG.4C****FIG.4D**

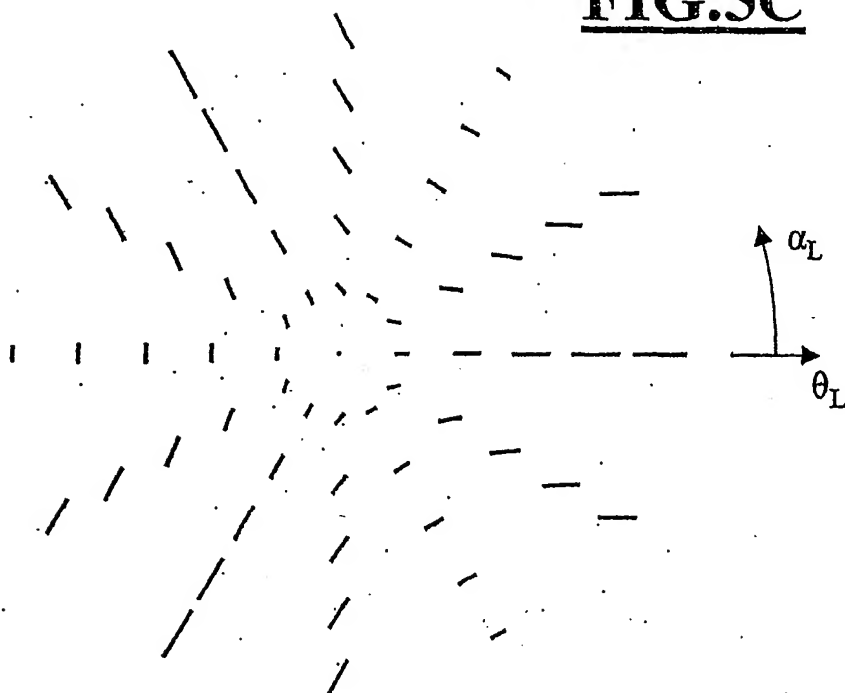
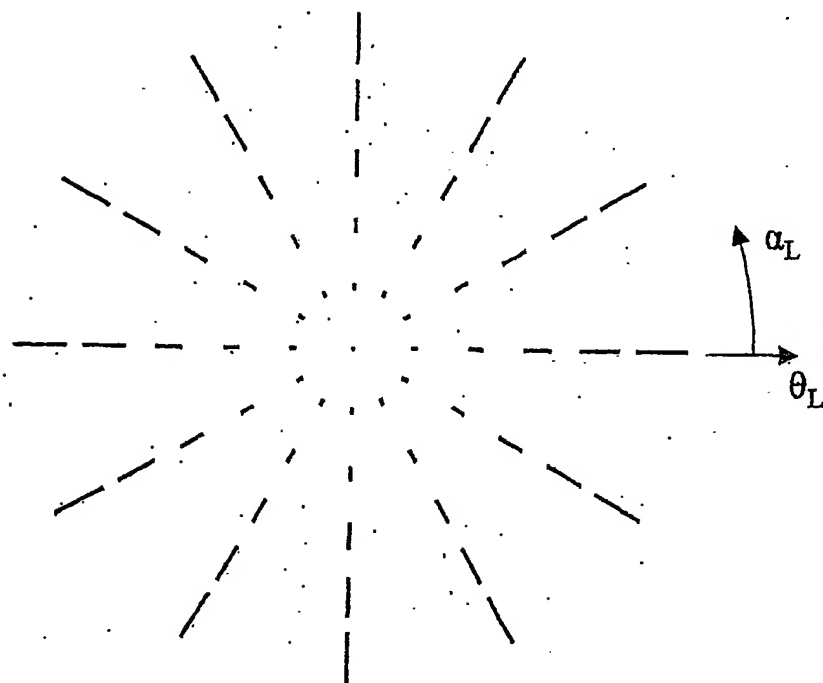
6/16

**FIG.4E****FIG.4F**

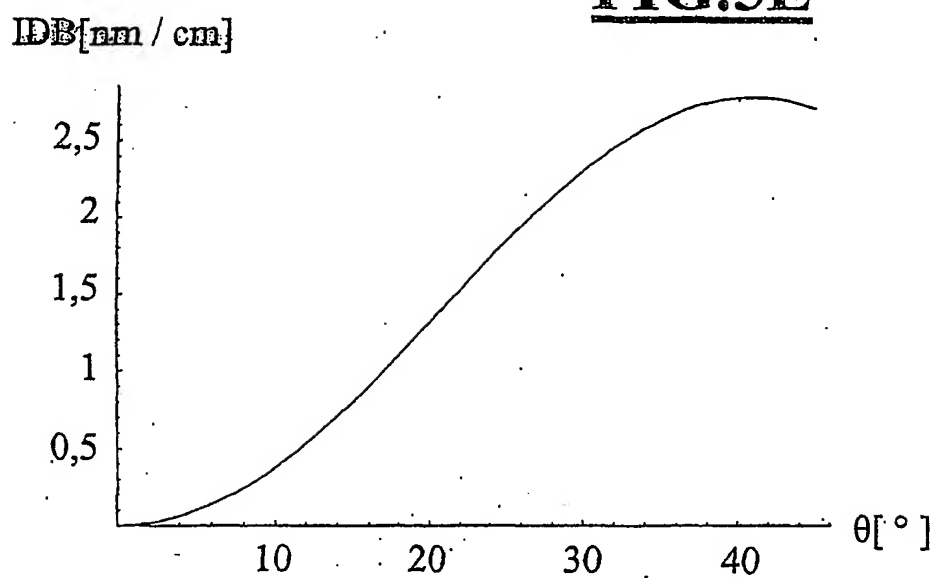
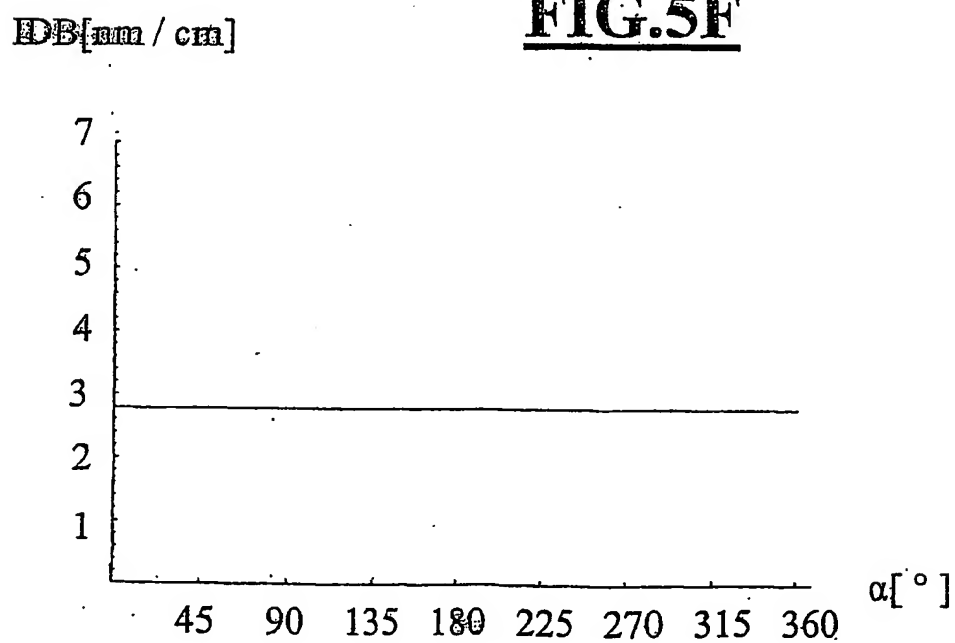
7/16

**FIG.5A****FIG.5B**

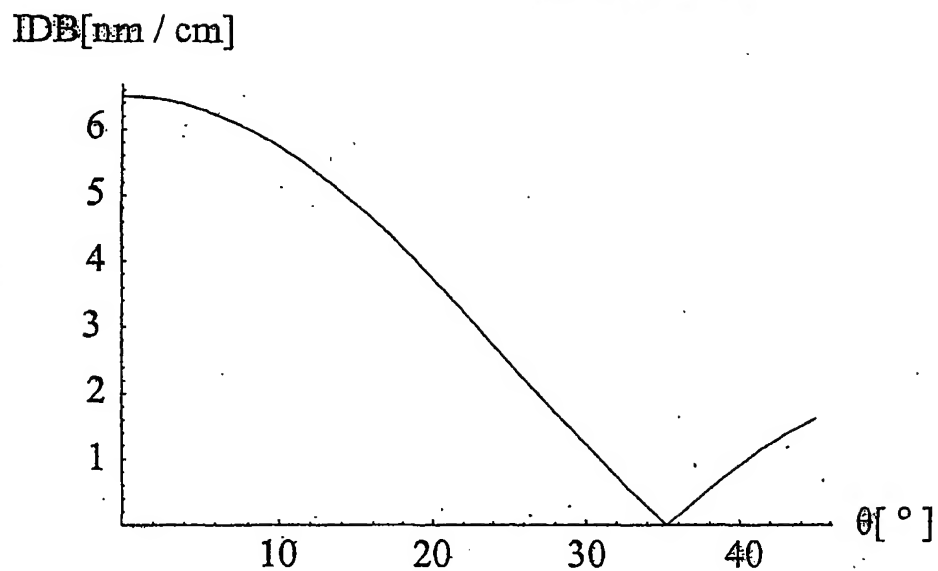
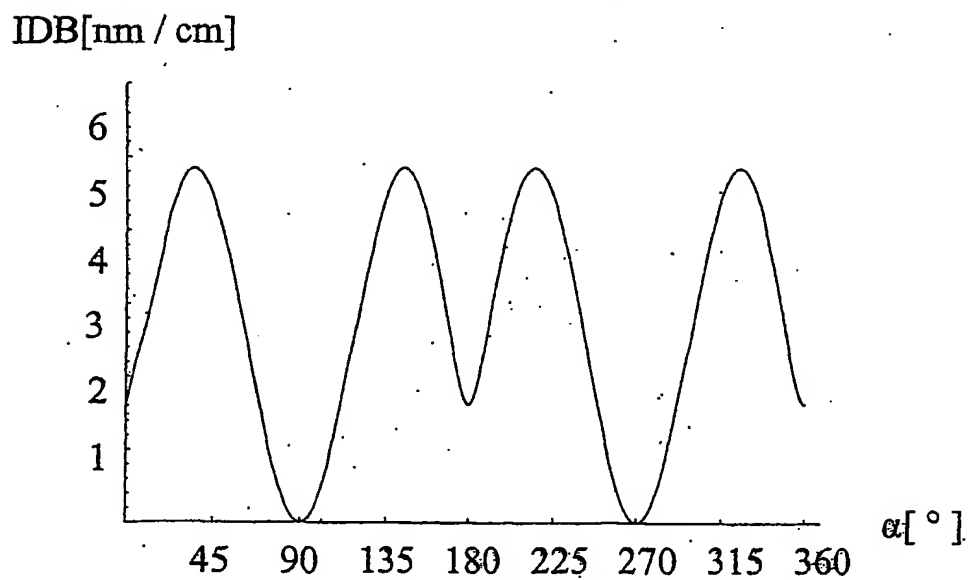
8/16

**FIG.5C****FIG.5D**

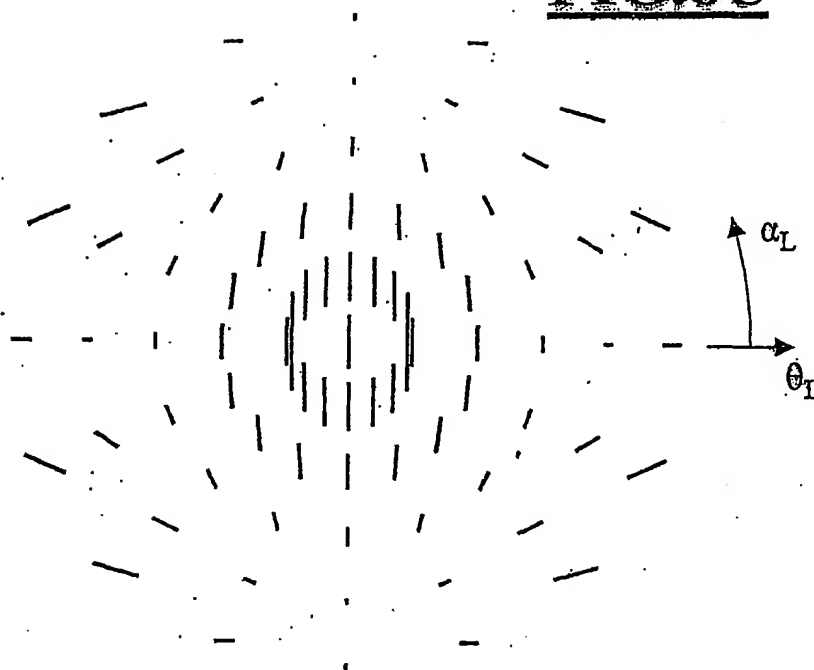
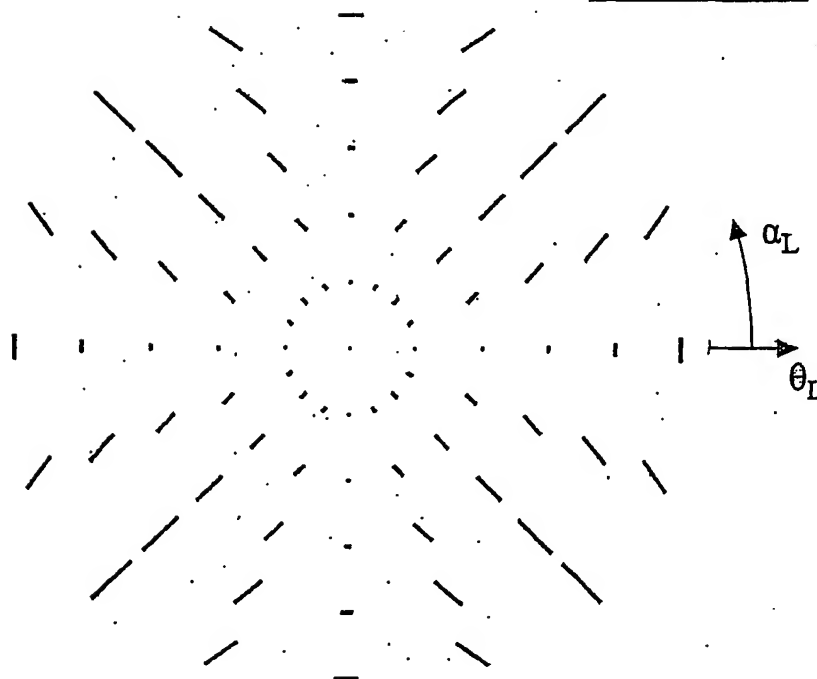
9/16

**FIG.5E****FIG.5F**

10/16

**FIG. 6A****FIG. 6B**

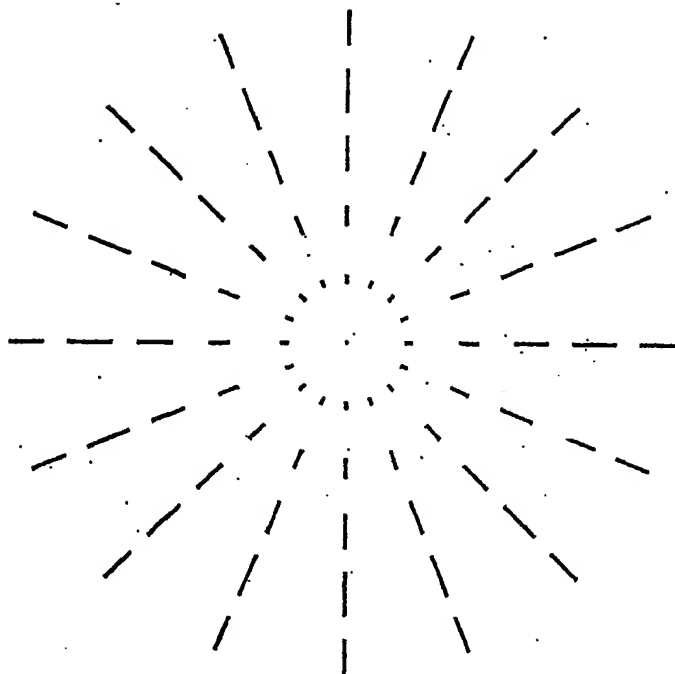
11/16

**FIG. 6C****FIG. 6D**



12/16

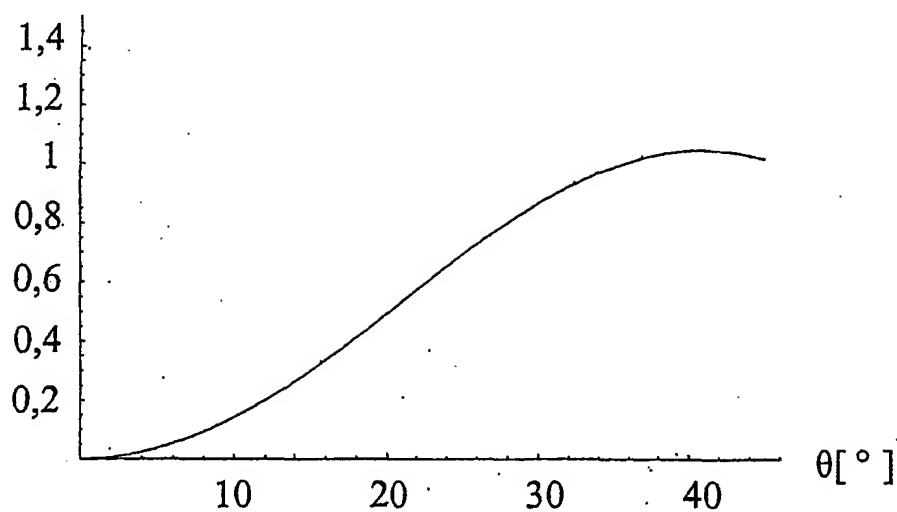
**FIG. 6E**



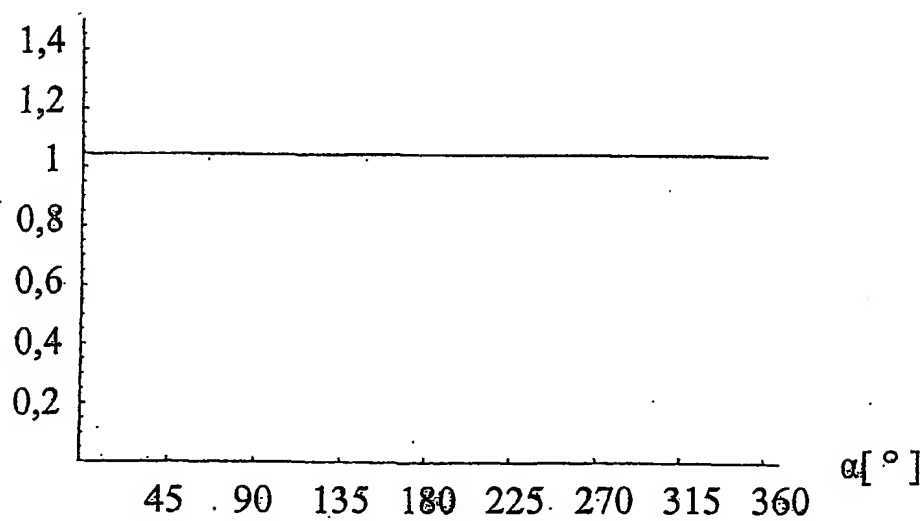
13/16

**FIG.6F**

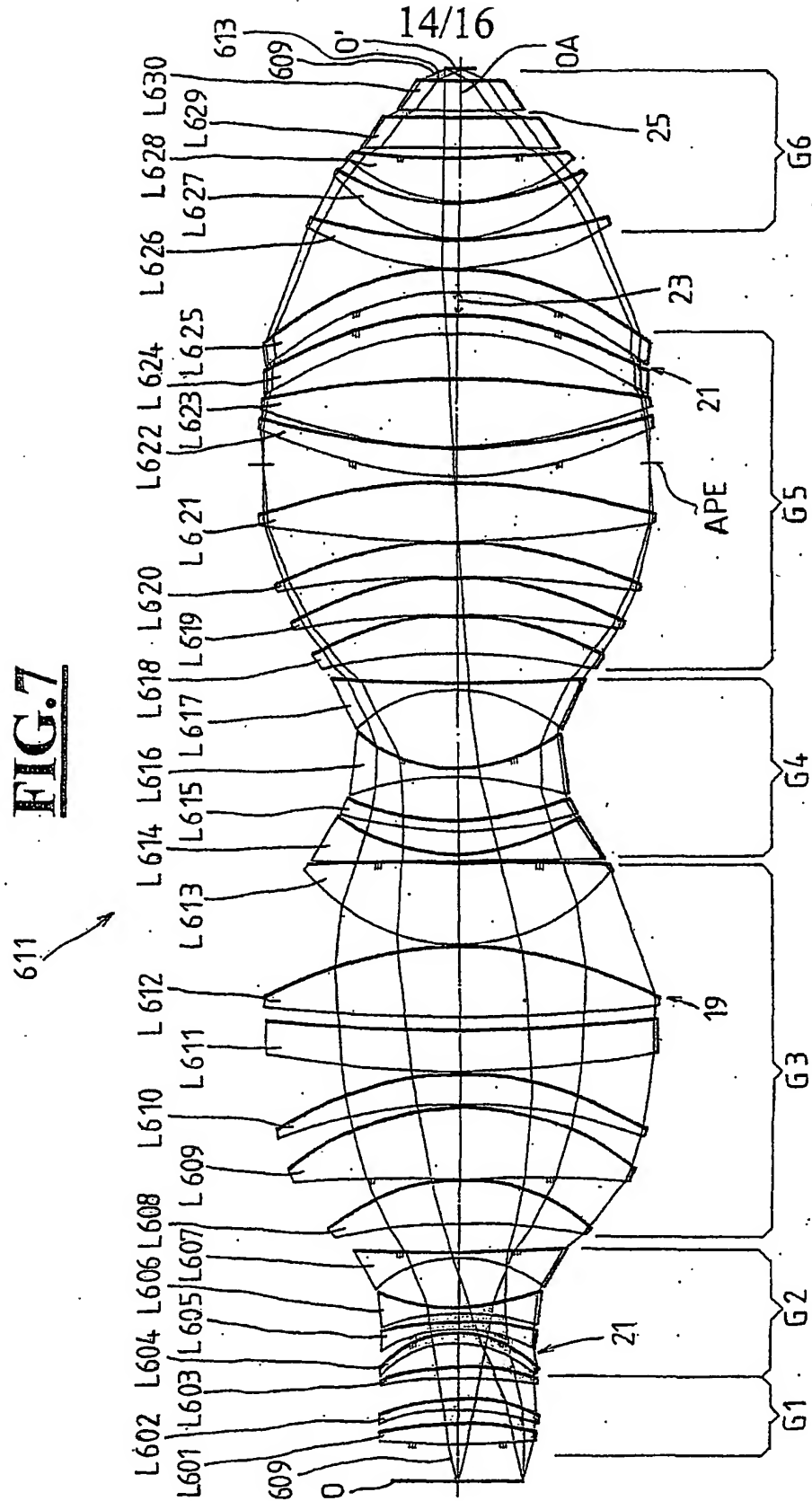
IDB[mm / cm]



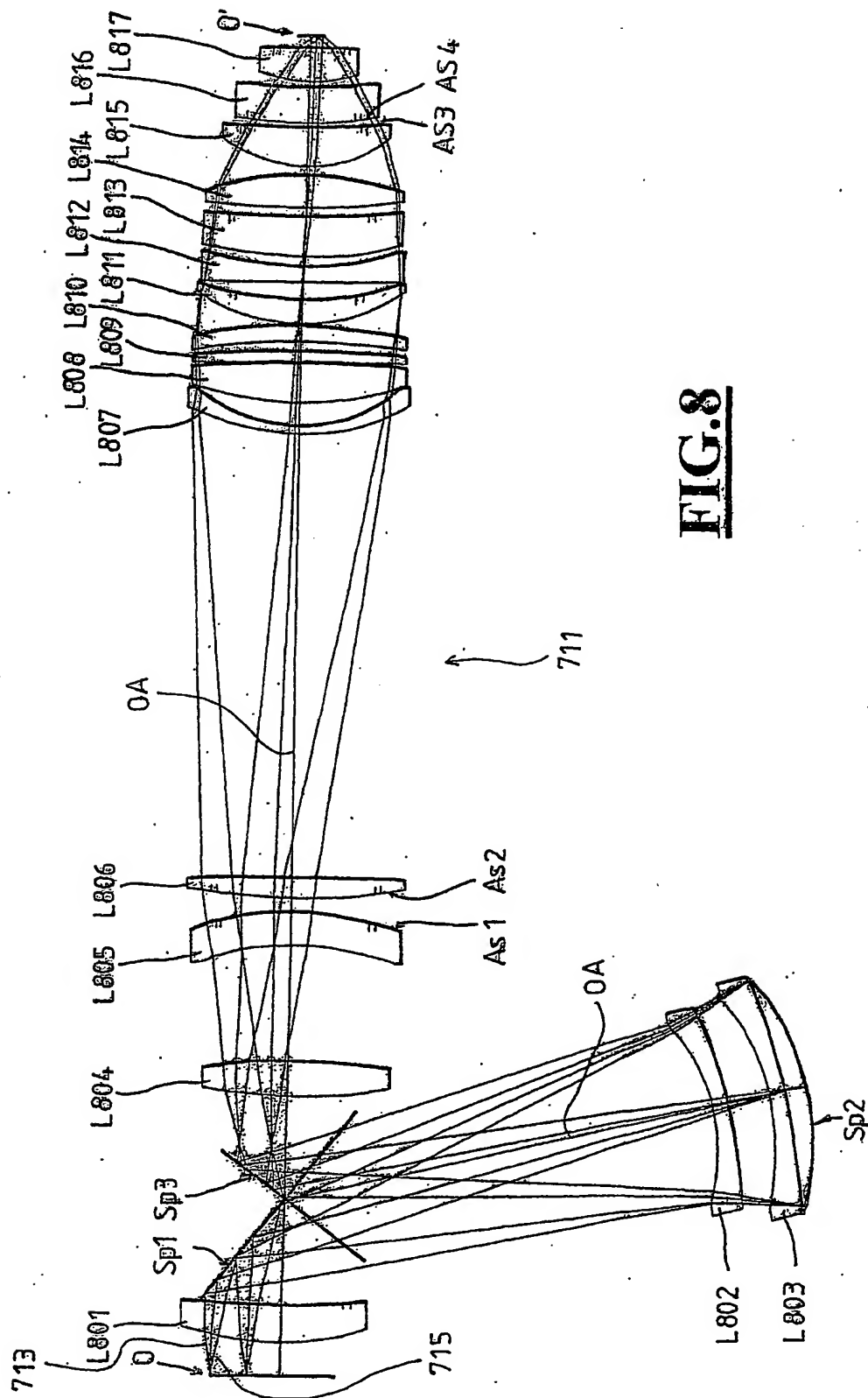
IDB[mm / cm]

**FIG.6G**

**FIG. 7**



15/16



**FIG. 8**

16/16

**FIG.9**